



Rafael Filipe Modesto Guerreiro

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Aproveitamento energético da ventilação natural

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João José Lopes de Carvalho

Arguente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde

Vogal: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril de 2015



Rafael Filipe Modesto Guerreiro

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Aproveitamento energético da ventilação natural

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João José Lopes de Carvalho

Arguente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde

Vogal: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril de 2015

Nota: Esta dissertação não foi escrita ao abrigo do novo acordo ortográfico de 1990.

Aproveitamento energético da ventilação natural

Copyright © Rafael Filipe Modesto Guerreiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao professor José Fernando de Almeida Dias, na qualidade de orientador científico, por toda a disponibilidade concedida, orientação, sugestões e partilha de conhecimentos que foram imprescindíveis ao longo da realização deste estudo.

A todo o corpo docente da FCT-UNL, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, pela formação que me foi concedida ao longo de todo o curso.

Aos meus colegas de faculdade, em especial àqueles que me acompanharam ao longo dos últimos anos do curso, tornando-se um apoio fundamental na realização do mestrado. Um agradecimento também aos meus amigos fora da faculdade, que foram sempre parte essencial ao longo do meu percurso académico.

Por fim, um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, pois sem eles nada disto teria sido possível.

Um grande obrigado a todos.

Resumo

Na presente dissertação analisam-se as potencialidades da produção de energia eléctrica num edifício a partir da ventilação natural. Para tal, e partindo de estudos anteriormente realizados, foi utilizado um modelo simplificado para o estudo da ventilação natural.

Numa primeira fase definiu-se a geometria mais adequada para o edifício, de modo a aproveitar o vento da melhor forma possível. De seguida fez-se a modelação do ventilador e do aerogerador considerados para este edifício.

Posto isto, recorrendo a um programa de cálculo numérico, foram analisadas as diferentes situações a que o edifício está sujeito. Aqui, e tendo sempre em conta que o espaço habitado necessita de um número mínimo de renovações de ar, fizeram-se diferentes simulações para as diferentes velocidades do vento, fazendo variar as áreas das aberturas, velocidades de rotação do ventilador, e o número de aerogeradores de modo a obter o número de renovações estipulado para o espaço ocupado.

Termos chave: Energia, ventilação natural, edifícios de habitação, ventiladores, aerogeradores.

Abstract

In this dissertation it is analyze the potential of electric energy production in a building from the natural ventilation. To that end, and departing from previous studies, it was used a simplified model for the study of natural ventilation.

In a first step we defined the most suitable geometry for the building in order to take the wind in the best way possible. Then we made the modeling of the fan and the aero generator considered for this building.

That said, the different situations that the building is subject were analyzed, using a numerical calculation program. Here, and bearing in mind that the living space requires a minimum number of air changes, different simulations have been made for different wind speeds, by varying the areas of the openings, the fan rotation speed and the number of wind turbines, in order to obtain the number of renewals set for the space.

Keywords: Energy, natural ventilation, residential buildings, fans, wind turbines.

Índice de matérias

1. Introdução	1
1.1. Motivação e objectivos	1
1.2. Metodologia	1
1.3. Caso de estudo	2
1.4. Estrutura da dissertação	3
2. Modelo simplificado da ventilação natural	5
2.1. Equações do modelo simplificado da ventilação natural	5
3. O edifício	9
3.1. Caracterização do edifício	9
3.1.1. Caso particular da área da chaminé	10
3.2. Diferentes situações a que o edifício estará sujeito	11
3.3. Localização do edifício e a variação do vento com a altura	12
4. Modelação	15
4.1. Modelação da Curva do Ventilador	15
4.2. Modelação da Curva do Aerogerador	20
5. Resultados do caso de estudo	27
5.1. Caso de estudo apenas com ventilação natural	27
5.2. Caso de estudo com ventilação mista	29
5.3. Caso de estudo com a introdução de aerogerador	31
5.4. Análise dos resultados obtidos	45
5.4.1. Distribuição da intensidade do vento na região de Lisboa	48
5.4.2. Aproveitamento energético conseguido no edifício	50
6. Conclusões e futuros campos de pesquisa	55
Bibliografia	57
Anexo A: Modelação numérica do ventilador e do aerogerador	59
Anexo B: Catálogo do ventilador	61
Anexo C: Catálogo do Aerogerador	65

Índice de figuras

Figura 1.1- Modelo simplificado do edifício (alçado principal).....	3
Figura 3.1- Modelo simplificado do edifício (alçado principal).....	9
Figura 3.2- Curva característica de uma chaminé cilíndrica.....	11
Figura 3.3- Variação típica do vento com a altura acima do solo.....	12
Figura 4.1- Curvas do ventilador, retiradas do catálogo, a diferentes velocidades de rotação...	15
Figura 4.2- Curvas do ventilador, interpoladas, a diferentes velocidades de rotação.....	16
Figura 4.3- Ventilador como insuflador e exaustor.....	17
Figura 4.4- Curva de pressão interior do edifício.....	17
Figura 4.5- Intersecção da curva do insuflador e da pressão interior do edifício.....	18
Figura 4.6- Intersecção da curva do insuflador corrigida e da pressão interior do edifício.....	18
Figura 4.7- Intersecção da curva do exaustor e da pressão interior do edifício.....	19
Figura 4.8- Intersecção da curva do exaustor corrigida e da pressão interior do edifício.....	20
Figura 4.9- Interpolação de grau 2 da curva de potência do aerogerador.....	21
Figura 4.10- Influência de cada termo da curva de pressão do aerogerador.....	22
Figura 4.11- Diferenças de pressão no aerogerador sem manipulação algébrica dos termos da equação.....	22
Figura 4.12- Esquema de velocidades e pressões antes e depois do aerogerador.....	23
Figura 4.13- Influência de cada termo da equação do aerogerador após manipulação algébrica.....	23
Figura 4.14- Diferenças de pressão no aerogerador após manipulação dos termos da equação.....	24
Figura 5.1- Modelo do edifício apenas com ventilação natural, sem ventilador nem exaustor...	28
Figura 5.2- Evolução do número de renovações de ar no espaço 2, função da velocidade do vento, asseguradas pela ventilação natural.....	28
Figura 5.3- Evolução da velocidade na abertura do ventilador/ aerogerador, função da velocidade do vento, apenas com ventilação natural.....	29
Figura 5.4- Variação da velocidade de rotação do ventilador, função da velocidade do vento...	30
Figura 5.5- Potência consumida pelo ventilador, função da velocidade do vento.....	30
Figura 5.6- Modelo do edifício.....	31
Figura 5.7- Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura do aerogerador, função da velocidade do vento, com um aerogerador.....	32
Figura 5.8- Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com um aerogerador.....	33
Figura 5.9- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com um aerogerador.....	33
Figura 5.10- Potência produzida por um aerogerador, função da velocidade do vento.....	34

Figura 5.11- Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com cinco aerogeradores em série	35
Figura 5.12- Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com cinco aerogeradores em série.....	35
Figura 5.13- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com cinco aerogeradores em série.....	36
Figura 5.14- Potência produzida pelos cinco aerogeradores em série, função da velocidade do vento.....	36
Figura 5.15- Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com dez aerogeradores em série.....	37
Figura 5.16- Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com dez aerogeradores em série.....	37
Figura 5.17- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com dez aerogeradores em série.....	38
Figura 5.18- Potência produzida pelos dez aerogeradores em série, função da velocidade do vento.....	38
Figura 5.19- Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com quinze aerogeradores em série.....	39
Figura 5.20- Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com quinze aerogeradores em série.....	39
Figura 5.21- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com quinze aerogeradores em série.....	40
Figura 5.22- Potência produzida pelos quinze aerogeradores em série, função da velocidade do vento.....	40
Figura 5.23- Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com trinta aerogeradores em série.....	41
Figura 5.24- Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com trinta aerogeradores em série.....	41
Figura 5.25- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com trinta aerogeradores em série.....	42
Figura 5.26- Potência produzida pelos trinta aerogeradores em série, função da velocidade do vento.....	42
Figura 5.27- Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com sessenta aerogeradores em série.....	43
Figura 5.28- Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com sessenta aerogeradores em série.....	44
Figura 5.29- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com sessenta aerogeradores em série.....	44
Figura 5.30- Potência produzida pelos sessenta aerogeradores em série, função da velocidade do vento.....	45

Figura 5.31- Curva de potência produzida no edifício, função da velocidade do vento.....	47
Figura 5.32- Potência consumida (negativa) e produzida (positiva) no edifício, função da velocidade do vento.....	47
Figura 5.33- Energia que pode ser consumida/ produzida, para cada classe de velocidades, por ano.....	48
Figura 5.34- Distribuição de Weibull, relativa a velocidade instantânea do vento ao longo do ano.....	49
Figura 5.35- Distribuição da energia consumida e produzida por ano, função da velocidade do vento.....	50
Figura 5.36- Interpolação do gráfico da energia consumida por ano, função da velocidade do vento.....	51
Figura 5.37- Interpolação do gráfico da energia produzida por ano, função da velocidade do vento.....	52
Figura 5.38- Modelo do edifício com os 8 pisos e as aberturas em série.....	53
Figura 5.39- Modelo do edifício com os 8 pisos e as aberturas em paralelo.....	53

Índice de tabelas

Tabela 3.1- Dimensões de cada espaço.....	10
Tabela 3.2- Áreas e volumes de cada espaço.....	10
Tabela 4.1- Curvas de pressão, ΔP , quando $v=4$ m/s e perdas de carga para diferentes aerogeradores em série.....	25
Tabela 5.1- Potência produzida (Watt) por cada conjunto de aerogeradores em série, a uma determinada velocidade do vento.....	46

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

A - área

A_k - Área da abertura k

CFD - Computational fluid dynamics

C_{pk} - Coeficiente de pressão no exterior da abertura k

C_{p0} - Calor específico do ar

D - diâmetro

g - Aceleração da gravidade

H_1 - Altura de queda à velocidade de rotação 1

H_2 - Altura de queda à velocidade de rotação 2

H_k - Cota média da abertura k medida relativamente à abertura ao nível mais baixo no espaço i

N - Número de incógnitas do problema

$NA(I)$ - Número de aberturas em cada espaço interno I

$NESP$ - Número de espaços internos

P - Pressão

Pot - Potência

P_0 - Pressão estática de referência

P_i - Pressão no espaço interno i

P_k - Pressão no exterior da abertura k

Q - Caudal volúmico

Q_i - Calor gerado no espaço i

Rot, ω - Velocidade de rotação do ventilador

T_0 - Temperatura exterior

T_i - Temperatura do espaço interno i

U_0 - Velocidade do vento

U_k - Velocidade média na abertura k

U_{limite} - Velocidade do vento para a qual o edifício garante o número de renovações mínimas no espaço habitado

v - velocidade do escoamento no ventilador/ aerogerador

z_0 - Altura a que U_0 é medido

z_r - Parâmetro de rugosidade do terreno

α_0 - Coeficiente de corte do vento

$\Delta\rho_i$ - Diferença entre a massa volúmica do ar no espaço i e a massa volúmica do ar exterior

ρ_i - Massa volúmica do ar no espaço i

ρ_0 - Massa volúmica do ar no exterior

ζ_k - Coeficiente de perda de carga na abertura k

ζ_{in} - Coeficiente de perda de carga à saída da chaminé quando o ar entra

ζ_{out} - Coeficiente de perda de carga à saída da chaminé quando o ar sai

1. Introdução

1.1. Motivação e objectivos

Os principais problemas das cidades de países desenvolvidos são o consumo de energia e recursos a um ritmo que ultrapassa a sua taxa natural de renovação, e a dissipação de energia, resíduos e poluição a níveis superiores aos que a ecossfera tem a capacidade de assimilar (Allard, 2005).

Os edifícios têm sido definidos como um dos principais responsáveis pelos problemas ambientais do planeta, quer durante a sua construção, quer durante a sua fase de operação. Vastas pesquisas têm vindo a intensificar o projecto de edifícios verdes, através do uso de tecnologias alternativas de construção sustentável e abordagens de operação no sentido de reduzir o uso de energia e, ao mesmo tempo, de maximizar a utilidade dos recursos naturais (Siew et al., 2011).

O projecto adequado de edifícios energeticamente eficientes requer o balanço de dois aspectos:

- O desempenho térmico da envolvente do edifício e a selecção de técnicas de aquecimento, arrefecimento e iluminação diurna apropriadas;
- Uma qualidade aceitável do ambiente interior em termos de conforto térmico, eficácia da ventilação ou qualidade do ar interior (Allard, 1998).

A preocupação com o aquecimento global resultou no ressurgimento do interesse em edifícios naturalmente ventilados. A ventilação natural está a ser cada vez mais usada em edifícios públicos modernos de modo a minimizar o consumo de energia não renovável, sendo uma medida efectiva de aumentar a qualidade do ar interior (Moghaddam et al., 2011). No entanto, a maioria dos edifícios actualmente continua extremamente dependente de meios artificiais de ventilação para as suas operações diárias (Chan et al., 2013).

Neste sentido, o objectivo do presente trabalho é a análise das potencialidades do aproveitamento energético da ventilação natural num edifício. Assim, propõe-se que, além da utilização da ventilação natural como meio de renovação do ar interior, esta seja utilizada para a produção de energia eléctrica.

1.2. Metodologia

Para a realização deste estudo, existiam dois caminhos possíveis:

- Através de um programa de *computational fluids dynamics (cfd)*;
- Uso de um modelo simplificado.

Para a realização da simulação numérica dos escoamentos de ventilação no interior dos espaços, um programa de *CFD* iria recorrer à solução das equações de Navier-Sokes através da utilização de métodos de discretização, como são os casos dos métodos das

diferenças finitas e dos volumes finitos. Este seria um processo muito pesado, requerendo uma maior quantidade de tempo e memória utilizada pelo computador, para a simulação de cada caso particular, pelo que se pôs de parte esta opção. No entanto, e como serviram de apoio ao longo deste estudo, alguns exemplos de trabalhos que optaram por esta via estão referenciados, tais como “Contribuições para o estudo da ventilação natural de edifícios” (Delgado, 1989) e “Ventilação natural: Estudo de um caso de ventilação natural” (Sequeira, 2010).

Assim, de modo a poder analisar diversas situações num curto espaço de tempo, optou-se pela utilização de um modelo simplificado. Este modelo utiliza as equações da continuidade, quantidade de movimento e da energia, bem como o conhecimento empírico dos coeficientes de perda de carga das aberturas e dos coeficientes de pressão devido à acção do vento sobre o edifício para, através de um modelo numérico, obter os parâmetros de ventilação mais relevantes. Este modelo simplificado permite a obtenção rápida de algumas variáveis que são suficientes para descrever o comportamento do escoamento numa determinada situação, tais como as velocidades nas aberturas (e consequentemente as renovações de ar no espaço interno) e propriedades médias em cada espaço (pressão, massa volúmica e temperatura). A vantagem da utilização deste modelo é que rapidamente se podem fazer alterações da geometria do edifício, das componentes de ventilação e das condições exteriores, obtendo-se de forma igualmente rápida as respectivas soluções para cada caso, tornando-se possível, posteriormente, fazer uma análise comparativa para as diversas situações escolhidas. É de referir que, apesar deste modelo simplificado desprezar uma série de factores, é suficiente para obter uma primeira aproximação daquilo que acontece no edifício no que toca à ventilação, aquando de um determinado conjunto de factores. Alguns estudos anteriores que recorreram a este modelo, e nos quais se encontra o modelo numérico em que se baseou este trabalho estão referenciados, e são: “Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney” (Delgado et al., 1996), “Pavilhões Industriais: Solicitações, Interferência e Ventilação Natural” (Saraiva et al., 1985) e “Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada” (Teixeira, 2009).

1.3. Caso de estudo

No seguimento do que foi abordado no subcapítulo 1.1, decidiu-se fazer a análise das potencialidades energéticas de um edifício, no que toca à ventilação natural. Assim sendo, a ideia inicial passou essencialmente por criar uma geometria de edifício que permitisse, por um lado, o aproveitamento do vento para a renovação de ar no interior do espaço habitado e, por outro, o aproveitamento deste para a produção de energia eléctrica, quando a sua intensidade fosse tal que superasse as renovações necessárias no interior do espaço.

Um outro aspecto importante a ter em conta é que não tem interesse para o caso de estudo a direcção do vento. Neste sentido, optou-se por uma geometria cilíndrica, de modo à direcção do vento não ser tida em conta nas simulações. A abertura de admissão de ar está então sempre voltada para a direcção de onde provem o vento.

Identificados os principais objectivos e limitações do edifício, definiu-se então que após a admissão do ar, este teria dois caminhos possíveis:

1. Ventilação do espaço habitado;
2. Seguir por uma conduta central na qual está inserida o aerogerador, para produção de energia eléctrica.

Assim, definiu-se a seguinte geometria para o edifício:

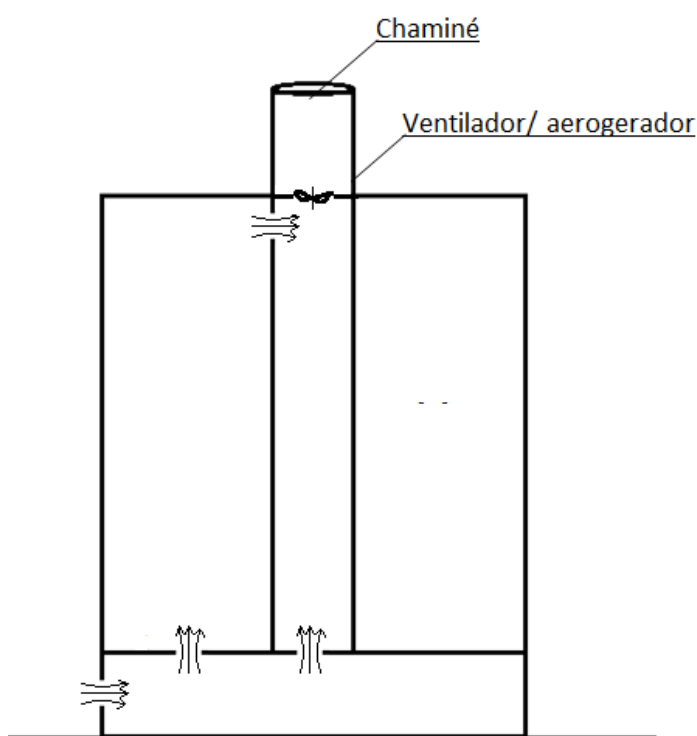


Figura 1.1- Modelo simplificado do edifício (alçado principal)

Esta será a imagem que se terá por base sempre que se referir o edifício deste estudo.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação divide-se, essencialmente, em 6 capítulos. No presente capítulo foram já sucintamente definidos os objectivos e a motivação para a realização deste estudo, bem como a metodologia pelo qual este será realizado. Foi ainda feita uma primeira abordagem ao caso particular que foi a base deste estudo, e o modo como este é conduzido.

No segundo capítulo é descrito todo o modelo teórico simplificado para a ventilação natural, que é a base do caso de estudo da dissertação, escrito em linguagem Fortran.

No capítulo 3 é descrito então, mais detalhadamente, todo o caso de estudo, fazendo-se toda a caracterização da geometria do edifício, a sua localização e condições de fronteira.

Já no capítulo 4, é abordado com o devido detalhe a modelação do ventilador e do aerogerador, parte em que se focou grande parte deste trabalho.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das diversas simulações, nas diversas situações possíveis para o modelo. É feita, simultaneamente, e passo a passo, toda uma análise destes mesmos resultados.

Por fim, no sexto capítulo, são comentados os resultados finais, retiradas conclusões, e sugeridos futuros campos de pesquisa relacionados com o estudo aqui desenvolvido.

2. Modelo simplificado da ventilação natural

A ventilação natural surge devido à diferença de pressão gerada por acção do vento entre as fachadas dos edifícios e pela alteração da densidade do ar por acção da temperatura (Viegas, 1995).

O modelo analítico simplificado para a ventilação natural, utilizado no presente trabalho, considera um edifício como sendo n espaços internos, e cada um destes espaços com m aberturas e l paredes.

As relações que vão ser apresentadas no presente capítulo são a base de um programa de cálculo compilado em linguagem Fortran, já utilizado em trabalhos anteriores, e referenciado na bibliografia (Delgado et al., 1996), (Saraiva et al., 1985), (Teixeira, 2009). O programa solicita um ficheiro de dados, com informações sobre características geométricas, dissipativas e térmicas do edifício, bem como das condições exteriores ao edifício. Após a introdução destes valores, o programa irá começar por calcular o número de incógnitas N do problema, com base no número de espaço de internos, $NESP$, e o respectivo número de aberturas, $NA(I)$, em cada espaço interno I :

$$N = \sum_{I=1}^{NESP} (NA(I) + 3) \quad (2.1)$$

Isto é, uma incógnita para a velocidade em cada uma das m aberturas, uma para a pressão, uma para massa volúmica e uma para a temperatura em cada um dos n espaços.

2.1. Equações do modelo simplificado da ventilação natural

As equações que regem este modelo analítico são as seguintes:

Equação da continuidade para cada espaço interno i

$$\sum_{k=1}^{m_i} U_k A_k = 0 \quad (2.2)$$

Onde U_k é a velocidade média na abertura k e A_k a sua respectiva área. De notar que, a velocidade U_k é positiva quando o ar entra no espaço i e negativa quando o ar sai do espaço i .

Equações relativas à velocidade nas aberturas

As equações utilizadas para a obtenção da velocidade em cada uma das aberturas são no fundo equações de Bernoulli adaptadas a cada tipo de abertura.

- Aberturas simples (portas, janelas, aberturas de ventilação, etc.)

$$(\Delta \rho_i H_k - \Delta \rho_i^* H_k^*) g + (P_i^* - P_i) - \frac{1}{2} \zeta_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (2.3)$$

Onde o primeiro termo corresponde à impulsão térmica, o segundo às diferenças de pressão e o terceiro às perdas de carga na abertura. O índice (*) indica os valores das variáveis no espaço em comunicação com o espaço i , através da abertura k . Nesta mesma

equação, ζ_k é o coeficiente de perda de carga da abertura k, valor obtido experimentalmente.

De referir que, para a situação em que a abertura k comunica com o exterior, P_i^* será igual ao valor de P_k calculado pela equação 2.4:

$$P_k = \frac{1}{2} C_{pk} \rho_0 U_0^2 \quad (2.4)$$

Onde C_{pk} , é também um parâmetro experimental, correspondente ao coeficiente de pressão no exterior da abertura k devido à acção do vento, e pode ser expresso por:

$$C_{pk} = \frac{P_k - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (2.5)$$

- Chaminé cilíndrica

As equações para este tipo de abertura foram obtidas experimentalmente (Delgado et al., 1996) tendo em conta tanto o seu funcionamento quer como exaustor, quer como sorvedor, e podem ser expressas pelas seguintes relações:

$$\Delta \rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 - (1 + \zeta_{in}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0, \left(\frac{U_i}{U_0} < 0 \right) \quad (2.6)$$

$$\Delta \rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 + F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0, \left(-1 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \right) \quad (2.7)$$

com

$$F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) = -1,25 \sin \left(\frac{\pi U_i}{2 U_0} \right) \text{ se } -0,8 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \quad (2.8)$$

$$F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) = 1,25 \text{ se } -1,0 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq -0,8 \quad (2.9)$$

$$\Delta \rho_i H_k g - P_i - (1 + \zeta_{out}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0, \left(\frac{U_i}{U_0} < -1 \right) \quad (2.10)$$

Nas expressões anteriores, $C_{pk} = -1,15$ é o coeficiente de pressão do vento à saída da chaminé quando, por alguma razão, $U_i = 0$, e $\zeta_{in} = 0,8$ e $\zeta_{out} = 1,1$ são os coeficientes de perda de carga à saída da chaminé, respectivamente, quando o ar entra ou sai (Delgado et al. 1996). O termo U_i refere-se à velocidade na abertura da chaminé e o termo U_0 à velocidade do vento exterior. De referir que uma vez que a velocidade de referência U_0 corresponde à altura de 10 metros, a velocidade U_0 no topo da chaminé (equações 2.6 a 2.10), a uma altura muito maior, poderá ter de ser corrigida tendo em conta o perfil de velocidades da camada limite, como será exemplificado no capítulo 3.3.

- Ventilador de velocidade variável

As equações para os ventiladores são obtidas a partir das curvas de funcionamento características do ventilador, e aproximadas por um polinómio de 2º grau. Assim, tendo em conta a análise adimensional para considerar as diferentes velocidades de rotação do ventilador (Gil e Araújo, 1997), obtém-se:

- Insuflador

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| + B_v \left(\frac{Rot}{1500}\right)^2 \quad (2.11)$$

○ Exaustor

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| - B_v \left(\frac{Rot}{1500}\right)^2 \quad (2.12)$$

Onde A_v e B_v são constantes obtidas dessa interpolação, para um determinado ventilador. O termo Rot é o número de rotações por minuto a que o ventilador está a funcionar e, neste caso, os 1500 é a velocidade de referência para a qual foram obtidos os valores de A_v e B_v . No capítulo 4 será apresentada com mais detalhe esta modelação, para o ventilador considerado.

○ Aerogerador

As equações para os aerogeradores são também obtidas a partir da curva de funcionamento características do aerogerador, e aproximadas por uma equação de 2º grau.

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = \frac{A_a}{U} + B_a \times U - \frac{C_a \times U}{|U|} \quad (2.13)$$

Onde A_a , B_a e C_a são constantes obtidas dessa interpolação, para um determinado aerogerador. No capítulo 4 será também apresentada com o devido detalhe esta modelação, para o aerogerador considerado.

Equação da energia para cada espaço interno i

Assumindo Q_i como o calor gerado no espaço i , o coeficiente k correspondente a respectiva abertura, e p à respectiva parede em contacto com o referido espaço, vem:

$$Q_i + \sum_{n=1}^{m_i} (\rho_0 c_{p_0} U_k A_k T^+) + \sum_{n=1}^{m_i} h_p A_p (T_i - T_i^{**}) = 0 \quad (2.14)$$

Note-se que o coeficiente $**$ corresponde ao espaço em comunicação com o espaço i através da parede p . O valor de T^+ é igual T_i se a velocidade média na abertura for negativa ou, igual a T_i^* caso esta seja positiva. Esta equação foi introduzida para os casos em que existe uma fonte interna de calor no espaço i .

Equação de estado dos gases perfeitos para cada espaço interno i

Para finalizar este conjunto de equações, assume-se que o ar se comporta como um gás ideal, sendo a equação de estado para cada espaço dada por:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} + \frac{T_i - T_0}{T_0} = 0 \quad (2.15)$$

Resta salientar que este programa determina os principais parâmetros ligados ao problema da ventilação de um edifício com i espaços internos, cada um com $k(i)$ aberturas, partindo do conhecimento da distribuição de pressões resultantes da acção do vento obtida experimentalmente em modelos do edifício na zona das aberturas, das características de funcionamento da chaminé, ventiladores e aerogeradores, também obtidas experimentalmente. O problema fica caracterizado por um sistema de n equações algébricas não lineares a n incógnitas, que é resolvido pelo método de Brown (Delgado et al., 1996).

De referir, por fim, que no presente trabalho foi considerada uma situação isotérmica pelo que as fontes de calor em cada um dos espaços são nulas e a temperatura e a massa volúmica são constantes.

3. O edifício

No presente capítulo será descrito exhaustivamente todo o caso de estudo. Inicialmente será caracterizada toda a geometria do edifício, em que será abordado o caso da chaminé, que teve particular interesse para o trabalho desenvolvido. Serão também abordadas as diferentes situações a que o edifício está sujeito, bem como definido o tipo de localização em que está o edifício, abordando o caso particular da variação da velocidade do vento com a altura.

3.1. Caracterização do edifício

Trata-se de um edifício modelo, isto é, um edifício protótipo destinado a simplificar o estudo a realizar. Este modelo é cilíndrico, de modo à direcção do vento não ter influência no estudo, sendo a abertura de admissão do vento sempre voltada para a origem deste. O edifício apresenta essencialmente 4 espaços distintos:

1. Admissão do vento;
2. Espaço habitado;
3. Conduto central por onde circula ar;
4. Chaminé

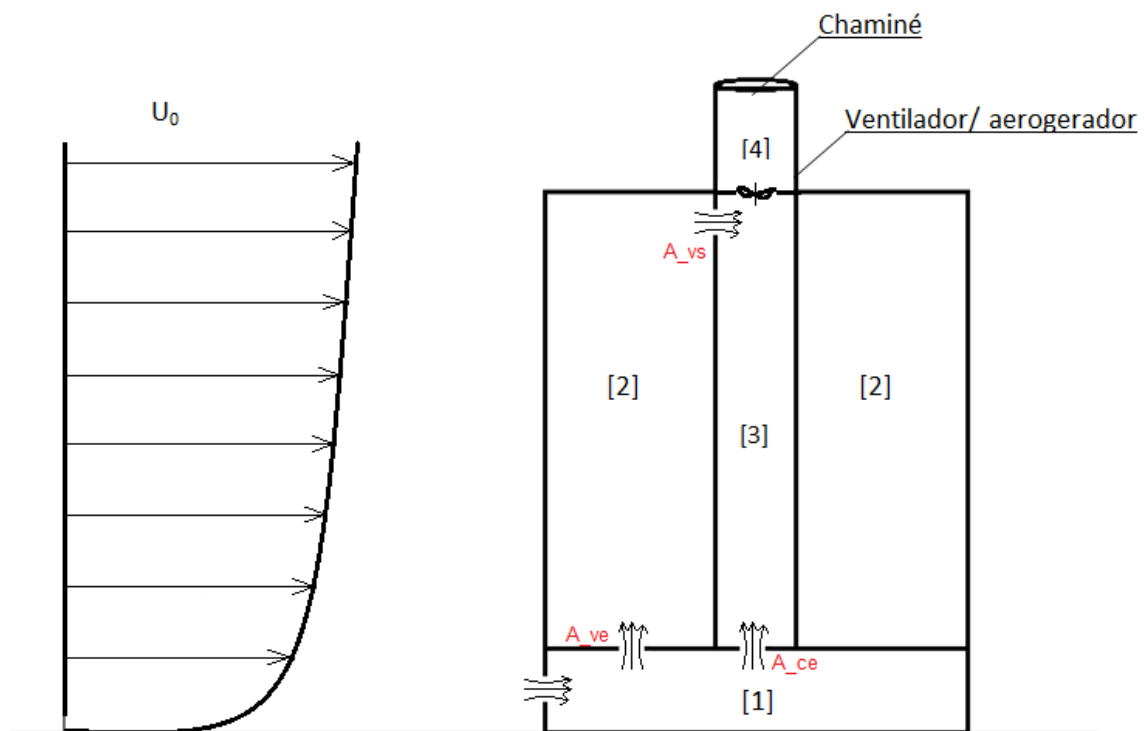


Figura 3.1- Modelo simplificado do edifício (alçado principal)

O espaço 1 contém uma abertura que faz a admissão do ar. Este ar, por sua vez, tem 2 opções: ou entra para o espaço 2 ou vai para a conduta central.

O espaço 2 tem uma abertura em baixo, que faz a admissão do ar, e uma abertura na parte superior, que faz a exaustão do ar para a conduta central. Para as simulações, considera-se o espaço 2 como um único espaço mas, na realidade, dado a sua altura de 25 m, corresponde a 8 pisos. Isto vai ser importante mais à frente, quando for necessário definir o número de renovações mínimo para este espaço.

A conduta central, tem uma abertura à entrada e uma abertura à saída, que faz a ligação à chaminé. Nesta última abertura, existe um ventilador/ aerogerador.

Tabela 3. 1- Dimensões de cada espaço

Espaço	Pé direito (m)	Diâmetro (m)
1	2	27.6
2	25	27.6
3	25	2.76
4	10	2.76

Tendo em conta as dimensões definidas para o edifício, vem:

Tabela 3. 1- Áreas e volumes de cada espaço

Espaço	Área em planta (m²)	Volume (m³)
1	598.3	1196.6
2	592.3	14807.8
3	6	150
4	6	60

Relativamente às áreas das aberturas, definiu-se a abertura de admissão de ar ao espaço 1 com 4 m² e a abertura da chaminé com 6 m². A abertura onde está instalado o ventilador/ aerogerador tem 0.785 m². As restantes aberturas serão variadas conforme as condições de vento.

3.1.1. Caso particular da área da chaminé

Um dos desempenhos principais de uma chaminé é o efeito de aspiração induzido devido à acção local do vento. Este efeito de aspiração é muito importante do ponto de vista da ventilação natural, uma vez que pode ser usado para aumentar a taxa geral de ventilação do edifício (Delgado et al., 1996). Assim, na figura 3.2 pode ser observado

situações em que o ar escoa para fora da chaminé ($U_i < 0$) e quando o ar escoa para dentro da chaminé ($U_i > 0$).

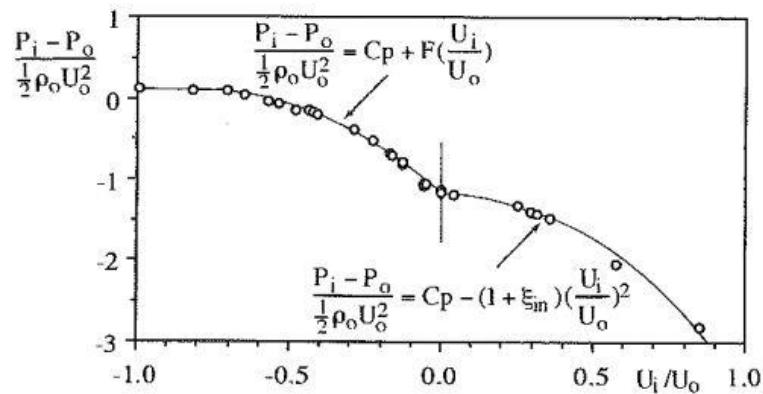


Figura 3.2- Curva característica de uma chaminé cilíndrica

Como se pode observar pelo gráfico, a chaminé funciona bem quando a velocidade na sua abertura é inferior a metade da velocidade do vento exterior. É nestas condições que se observa o referido efeito de aspiração. Como o aerogerador funciona com velocidades até 20 m/s, para a chaminé continuar a funcionar como tal (ter o efeito de sucção), resolveu aumentar-se a área da abertura da chaminé para 6m², de modo à razão de velocidades $\frac{U_i}{U_o}$ ir para o intervalo [-0.5;0.0].

3.2. Diferentes situações a que o edifício estará sujeito

É necessário ter em conta que há a necessidade de manter constante o número de renovações mínimas de ar novo no espaço 2, nas diferentes situações de vento a que o edifício está sujeito. Deste modo, o edifício vai estar sujeito a três situações distintas, divididas por um valor de velocidade do vento para o qual este consegue ser auto-suficiente em termos de renovações de ar. Esta velocidade será daqui em diante denominada de U_{limite} . Assim, tem-se:

1. Ausência de vento exterior ($U_o = 0$)- situação em que as aberturas do espaço 2 estão completamente abertas, e a abertura de entrada da conduta central completamente fechada. Neste caso, a renovação do ar do espaço 2 é assegurada apenas pelo ventilador.
2. $U_o > 0$ m/s mas menor que U_{limite} - neste intervalo, a ventilação do espaço 2 é denominada mista, isto é, está a ser assegurada quer pelo ventilador, quer pela ventilação natural. Neste caso, o ventilador diminui a sua velocidade de rotação, à medida que U_o aumenta. As aberturas do espaço 2 continuam completamente abertas, ao passo que a abertura de entrada da conduta continua fechada.

3. $U_0 > U_{\text{limite}}$ - esta é a situação em que o edifício passa a ser auto-suficiente, uma vez que o ventilador pode ser desligado, sendo a ventilação do espaço 2 assegurada unicamente pela ventilação natural. Além disso, o(s) aerogerador(es) será(ão) accionado(s), pelo que se começará a produzir energia eléctrica em simultâneo. Para tal, a abertura de entrada da conduta central será progressivamente aberta, ao passo que, à medida que a velocidade do vento aumenta, e para não ultrapassar o número de renovações impostas, as aberturas do espaço 2 serão progressivamente fechadas (nunca totalmente).

3.3. Localização do edifício e a variação do vento com a altura

É de salientar que a velocidade do vento varia com a altura. Deste modo, considere-se U_0 como a velocidade do vento de referência, tipicamente medida a 10m de altura. No caso de estudo, o edifício contém apenas duas aberturas em contacto com o exterior:

1. Abertura de admissão do vento, com uma cota média de 1m;
2. Chaminé, com uma cota média de 37m,

Significa isto que a velocidade do vento U_0 , à altura da chaminé, já não pode ser considerada válida.

A velocidade do vento U_0 aumenta significativamente com a altura acima do solo, com a velocidade de zero à superfície. O gradiente de velocidades desce com a altura, à medida que as forças de fricção descem, como é mostrado na figura 3.2. Uma expressão que é comum ser utilizada para descrever a dependência de U_0 da altura z é:

$$U(z) = U_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\alpha_0} \quad (3.1)$$

onde z_0 é a altura a que U_0 é medido, tipicamente 10m, e α_0 é o coeficiente de corte do vento, e é fortemente dependente do terreno (Andrews & Jelley, 2007).

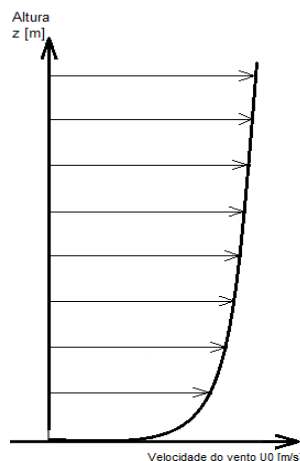


Figura 3.3- Variação típica do vento com a altura acima do solo

A rugosidade do terreno é caracterizada pelo parâmetro de rugosidade do terreno z_r , que depende do tipo de localização do edifício. No caso de estudo, considerou-se este parâmetro para uma zona rural, tendo sido tomado o valor de 0.026 m. Como

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{z_r}{10} \right)^{0.2} \quad (3.2)$$

$$\text{Logo, } \alpha_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{0.026}{10} \right)^{0.2} = 0.152$$

Pelo que, como $z=37\text{m}$ e $z_0=10\text{m}$, tem-se que U_0 tem a seguinte relação à cota da chaminé:

$$U(37) = U_0 \left(\frac{37}{10} \right)^{0.152} \Leftrightarrow U(37) = 1.219U_0$$

Esta relação foi considerada nas equações 2.6 a 2.10 para a chaminé, como já referido no capítulo 2.

4. Modelação

4.1. Modelação da Curva do Ventilador

Para a modelação da curva do ventilador, teve-se por base o Vent EF 1004/H 9A/A com diâmetro de 1 m, em anexo.

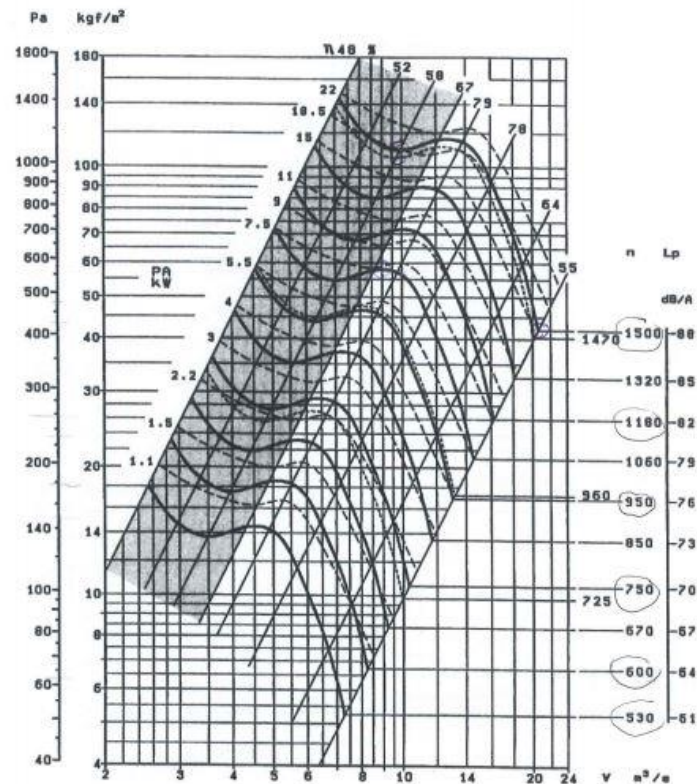


Figura 4.1 - Curvas do ventilador, retiradas do catálogo, a diferentes velocidades de rotação

Partindo da curva à velocidade de 1500 rpm, e apenas para a zona de funcionamento (fora da zona a sombreado), fez-se uma interpolação para um polinómio de grau 2. Para tal, foram necessários dois pontos desta curva, obtendo-se a seguinte equação:

$$P = -\frac{17}{6}Q^2 + 1568 \quad (4.1)$$

Sendo A a área varrida pelo ventilador igual a 0.785m^2 , vem:

$$\begin{aligned} P &= -\frac{17}{6} \times (v \times A)^2 + 1568 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P &= -\frac{17}{6} \times v^2 \times 0.785^2 + 1568 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P &= -1.75v^2 + 1568 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Recorrendo à teoria de semelhança de turbomáquinas (Gil e Araújo, 2013), têm-se as seguintes relações:

- Relação adimensional para o coeficiente de altura:

$$\frac{gH_1}{\omega_1^2 D^2} = \frac{gH_2}{\omega_2^2 D^2} \Leftrightarrow H_2 = H_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \Leftrightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \quad (4.3)$$

- Relação adimensional para o coeficiente de caudal:

$$\frac{Q_{v1}}{\omega_1 D^3} = \frac{Q_{v2}}{\omega_2 D^3} \Leftrightarrow Q_{v2} = Q_{v1} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \Leftrightarrow v_2 = v_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (4.4)$$

Pelo que, substituindo na equação (4.2) as relações (4.3) e (4.4), respectivamente em P e v, obtém-se a curva adimensionalizada do ventilador:

$$P \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 = -1.75 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} v \right)^2 + 1568 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P = -1.75 v^2 + 1568 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (4.5)$$

Sendo ω_1 a velocidade de rotação que se pretende e ω_2 a de referência (neste caso 1500 rpm).

O seguinte gráfico mostra as interpolações do ventilador para algumas velocidades de rotação.

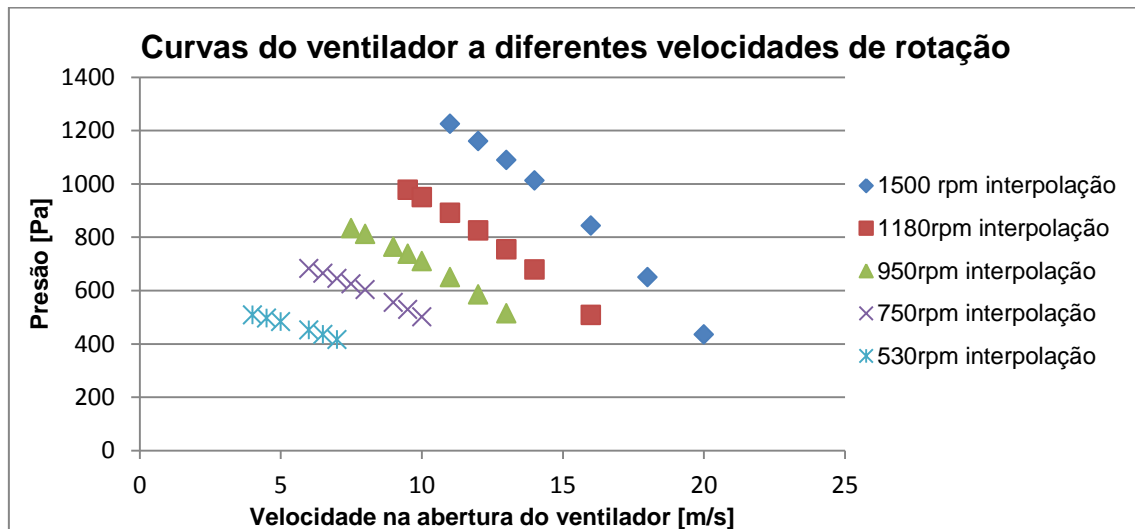


Figura 4.2- Curvas do ventilador, interpoladas, a diferentes velocidades de rotação

Como se pode observar, os valores interpolados são coerentes no que toca à variação da velocidade de rotação, e representam uma aproximação razoável às verdadeiras curvas do ventilador na zona de funcionamento.

Porém, para modelar a equação do ventilador, há que ter em conta que o ventilador funciona em duas situações distintas, insuflador e exaustor, consoante o lado da abertura que

se está a considerar. Para tal, de agora em diante, vai-se trabalhar apenas com a equação inicial do ventilador, à velocidade de rotação de 1500 rpm

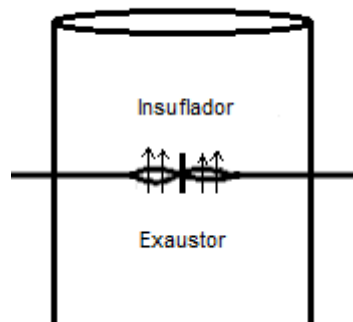


Figura 4.3- Ventilador como insuflador e exaustor

Neste seguimento, sabe-se que a curva da instalação corresponde a $\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta v^2$, sendo o termo ζ correspondente ao total das perdas de carga nas aberturas desde a entrada do edifício até à chaminé. Como para cada abertura se considerou uma perda de carga de 2,5 e o edifício contem 3 aberturas, excluindo a do ventilador e a chaminé, obtém-se a seguinte distribuição de pressões para as diferentes velocidades no edifício:

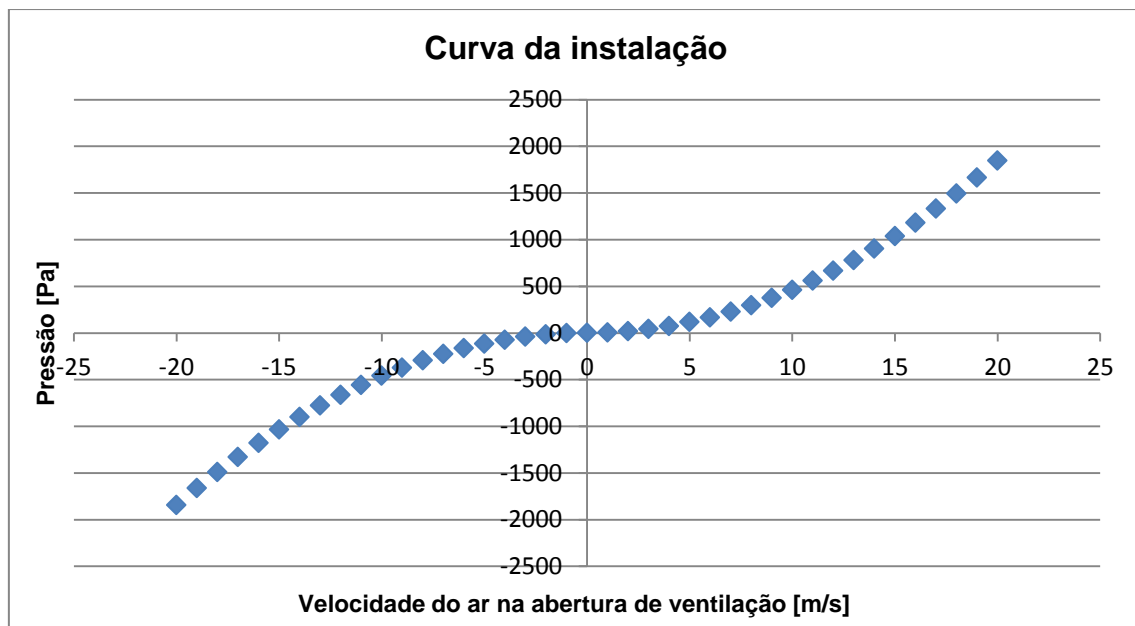


Figura 4.4- Curva da pressão interior do edifício

Começando por analisar o caso em que o ventilador funciona como insuflador, sabe-se que este vai introduzir diferenças de pressão positivas. Deste modo, a sua curva será uma parábola com concavidade negativa e valor máximo em 1568. A equação correspondente é então $P = -1.75v^2 + 1568$.

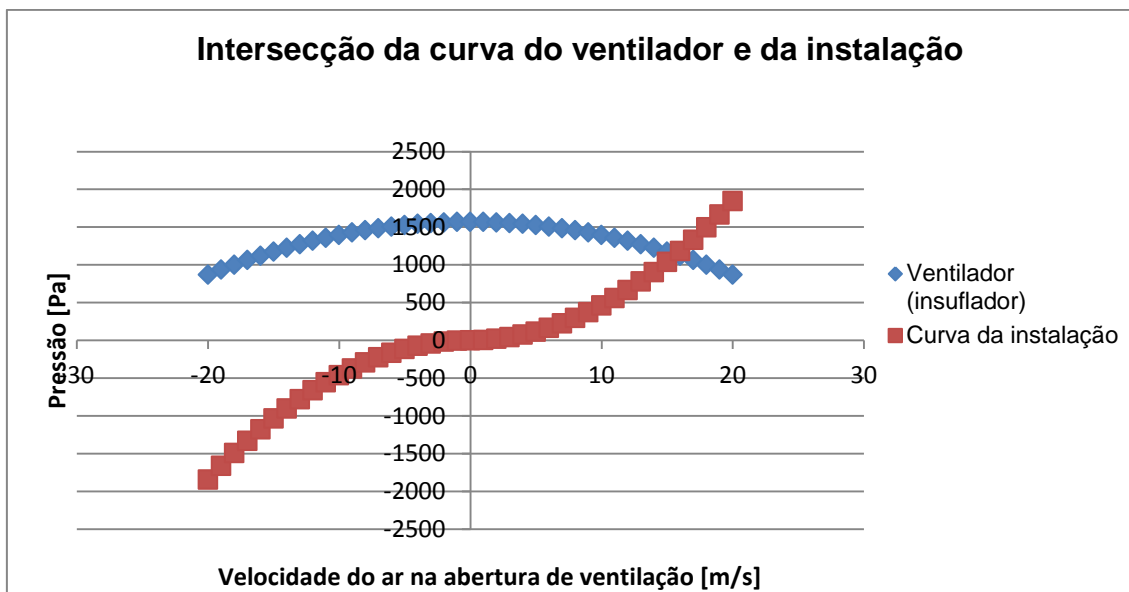


Figura 4.5- Intersecção da curva do insuflador e da pressão interior do edifício

Como se pode concluir do gráfico, o que acontece é que, uma vez que a curva do ventilador é uma função quadrática, esta irá intersectar a curva da instalação em dois pontos. Torna-se então necessário escolher o ponto correspondente à solução correcta. Uma vez que se trata de um insuflador, têm-se velocidades positivas, associadas a diferenças de pressão positivas. Assim sendo, fez-se um artifício matemático, de modo a todos os valores com velocidades negativas não intersectarem a curva de pressão do edifício. Para tal, basta alterar o termo v^2 para $v \times |v|$. Assim, a equação do ventilador a funcionar como insuflador passa a ser $P = -1.75v \times |v| + 1568$, com o seu gráfico a intersectar a curva de pressão do edifício apenas no ponto de velocidade positiva.

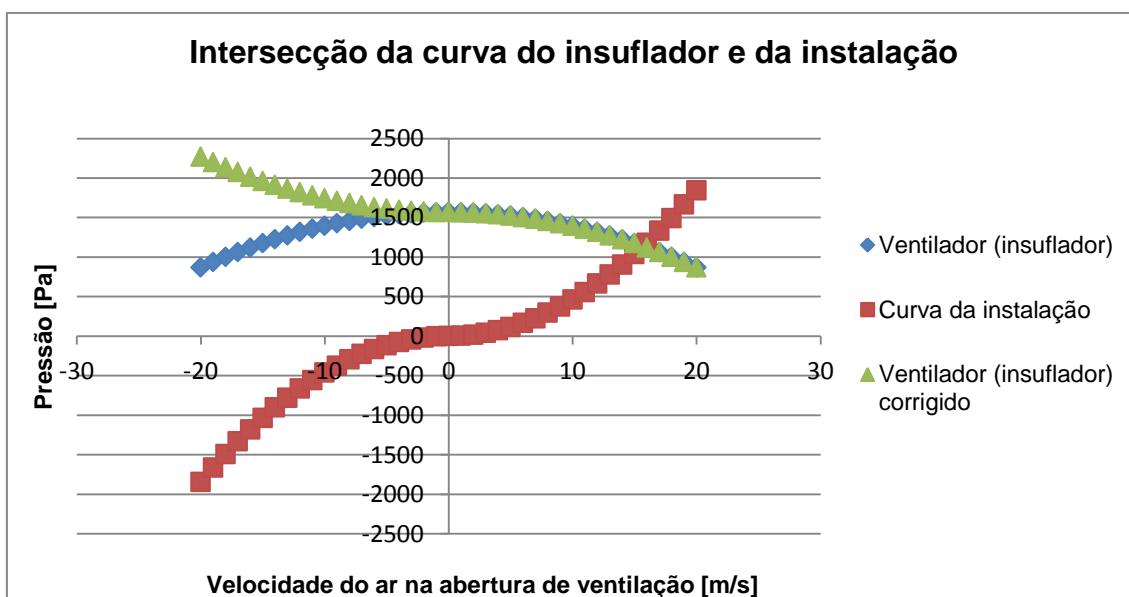


Figura 4.6- Intersecção da curva do insuflador corrigida e da pressão interior do edifício

Analogamente, para o exaustor vai ser necessário alterar a curva. Sabe-se que para este caso, as velocidades apresentam-se como negativas, originando também pressões negativas. Assim, a curva do exaustor será uma parábola com mínimo em -1568 e com concavidade positiva:

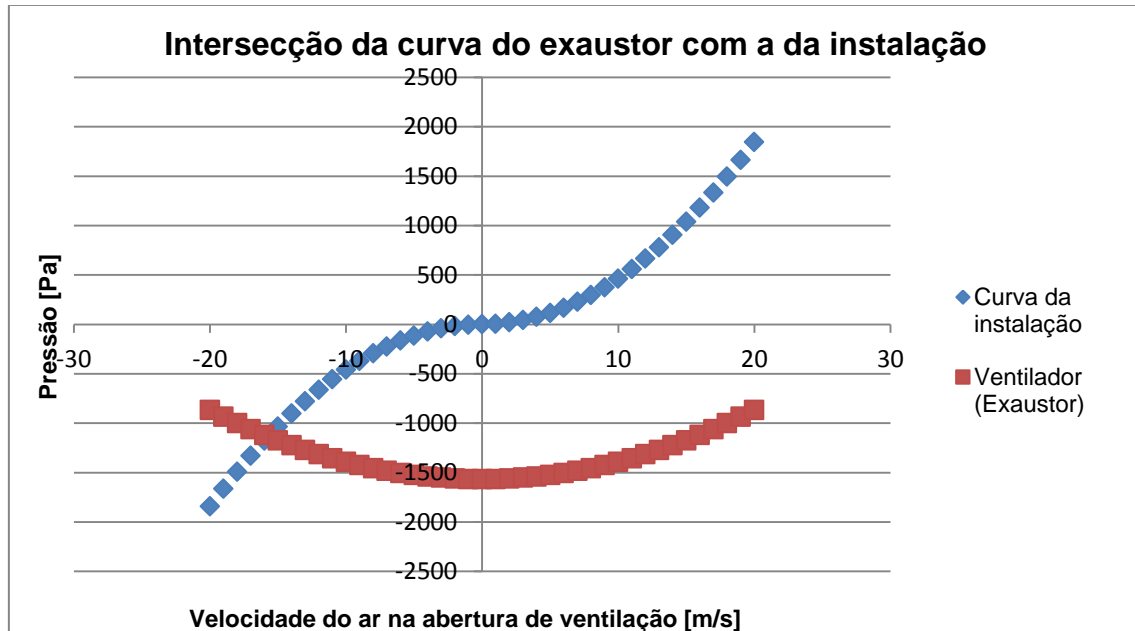


Figura 4.7- Intersecção da curva do exaustor e da pressão interior do edifício

Novamente, devido à curva do ventilador ser uma função de grau 2, esta irá intersectar a curva de pressão do edifício em dois pontos distintos. De modo ao programa apenas considerar a parte da curva que corresponde à realidade (2º e 3º quadrante do eixo cartesiano), resolveu fazer-se a seguinte manipulação algébrica: Em vez de $P = 1.75v^2 - 1568$ a função passará a ser $P = -1.75v \times |v| - 1568$, que mantém a parte que interessa (velocidade negativa) e faz com que a parte com velocidade positiva não vá intersectar o gráfico da instalação.

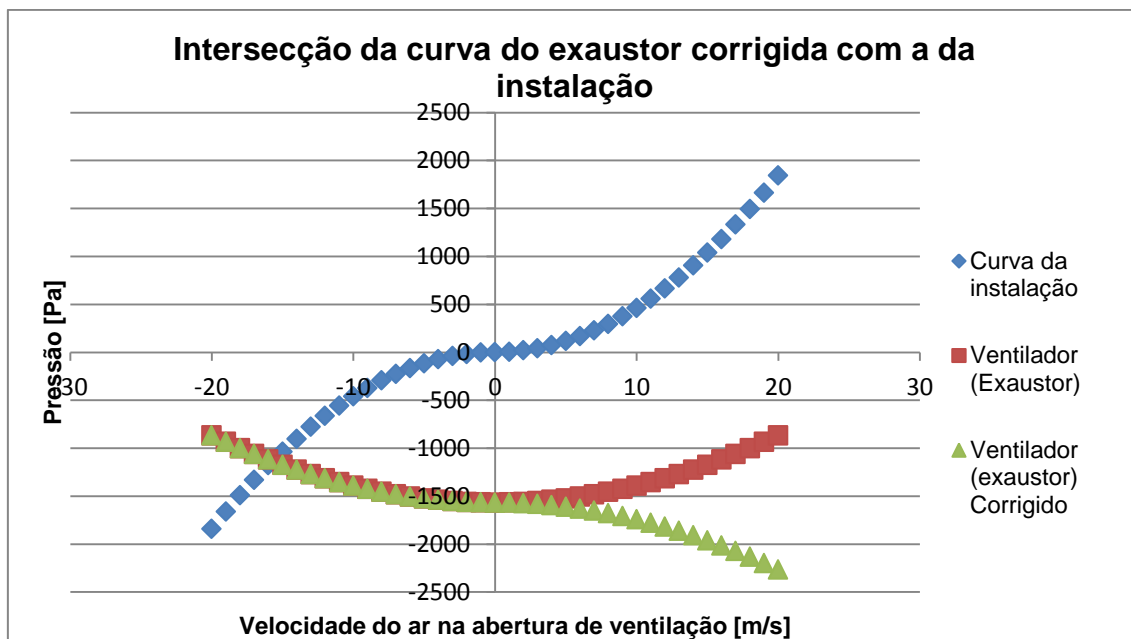


Figura 4.8- Intersecção da curva do exaustor corrigida e da pressão interior do edifício

4.2. Modelação da Curva do Aerogerador

Na impossibilidade de obter dados experimentais do aerogerador com o mesmo formato que o ventilador, optou-se por partir da curva de potência de um aerogerador já existente. Assim, seleccionou-se um aerogerador com um diâmetro do rotor de 0.928m do catálogo “Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers”, em anexo, o qual se considera ser uma boa aproximação a um aerogerador de diâmetro de 1m. A curva de potência e respectiva interpolação são apresentadas na seguinte figura:

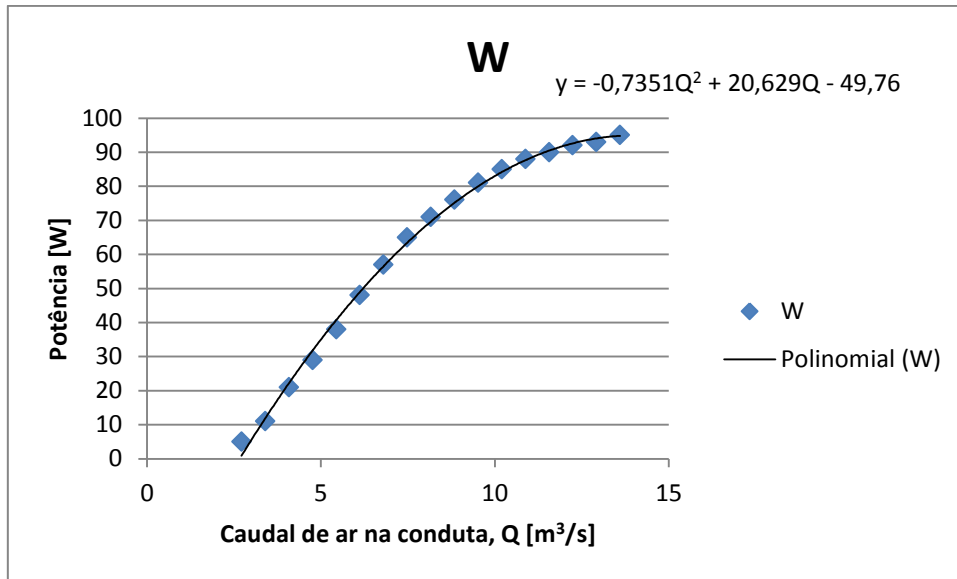


Figura 4.9- Interpolação de grau 2 da curva de potência do aerogerador

$$Pot = -0.7351Q^2 + 20.629Q - 49.76 \quad (4.6)$$

Visto que:

$$Pot = F \times v \Leftrightarrow Pot = P \times A \times v \Leftrightarrow Pot = P \times A \times \frac{Q}{A} \Leftrightarrow Pot = P \times Q \Leftrightarrow P = \frac{Pot}{Q} \quad (4.7)$$

Substituindo (1) em (2) vem:

$$P = \frac{-0.7351Q^2 + 20.629Q - 49.76}{Q} \Leftrightarrow \Leftrightarrow P = -0.7351Q + 20.629 - \frac{49.76}{Q} \quad (4.8)$$

Sendo $Q = v \times A$, e sendo $A=0.785 \text{ m}^2$ vem:

$$P = -0.7351 \times v \times 0.785 + 20.629 - \frac{49.76}{v \times 0.785} \Leftrightarrow \Leftrightarrow P = -0.577v + 20.629 - \frac{63.389}{v} \quad (4.9)$$

Com esta expressão, torna-se possível obter os valores para a diferença de pressão obtida no aerogerador.

No entanto, a questão da modelação da curva do aerogerador não fica aqui resolvida. Se se colocar a equação tal como está no programa, este vai transmitir resultados que não são os que acontecem na realidade. Para tal, serão necessários alguns artifícios matemáticos para obter aquilo que se deseja.

Deste modo, começa-se por chamar A, ao termo $-0.577v$, B ao termo 20.629 e C ao termo $-63.389/v$. O que se pretende neste momento, é perceber o que cada termo irá representar na curva do aerogerador. Assim, vai-se representar, separadamente, cada termo em função da velocidade do vento:

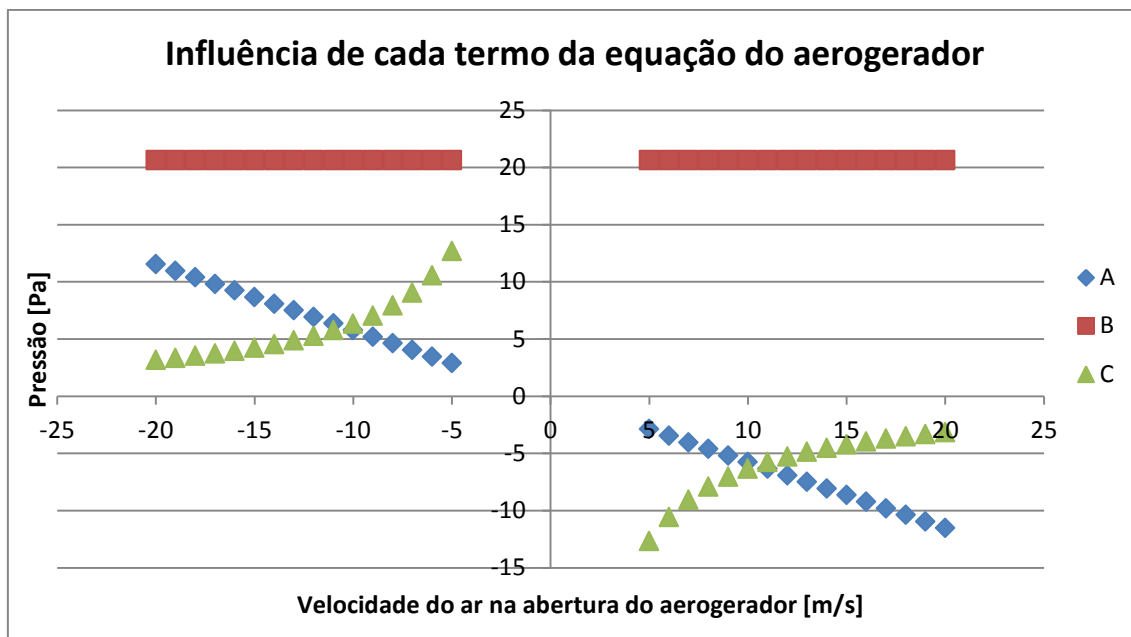


Figura 4.10- Influência de cada termo da curva de pressão do aerogerador

Com esta introdução dos termos da equação, ir-se-ia obter a seguinte distribuição de pressões:

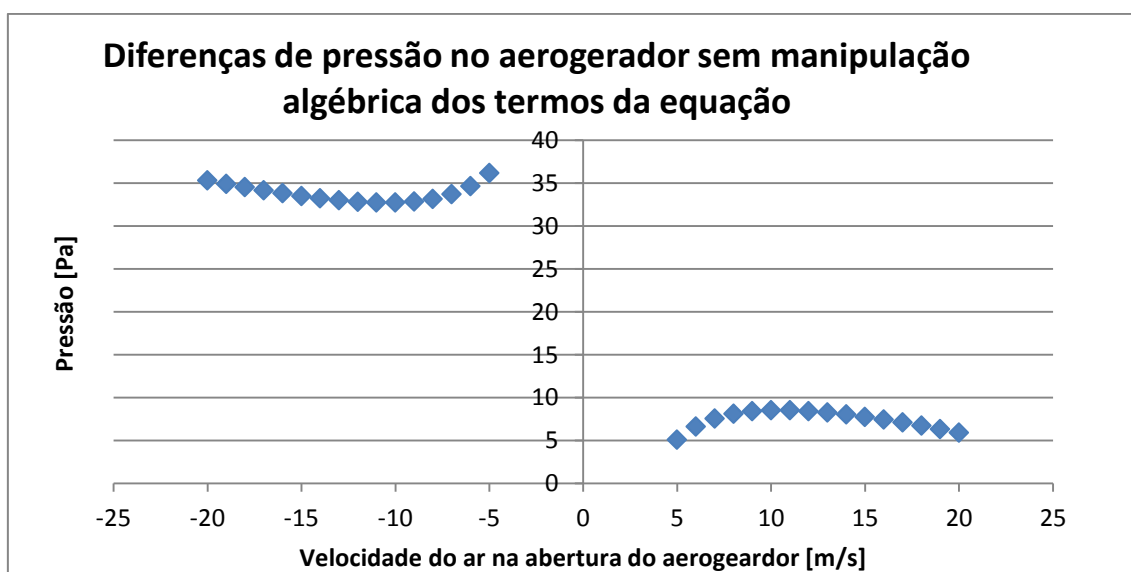


Figura 4.11- Diferenças de pressão no aerogerador sem manipulação algébrica dos termos da equação

O que não corresponde à realidade, uma vez que a montante do aerogerador (velocidade negativa) vai-se ter pressões positivas e a jusante o aerogerador (velocidade positiva) ir-se-ão ter pressões negativas.

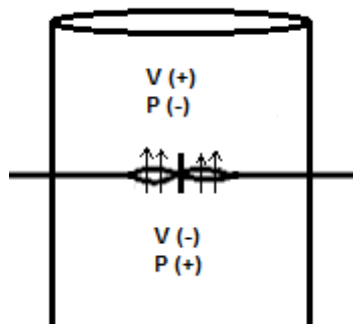


Figura 4.12- Esquema de velocidades e pressões antes e depois do aerogerador

Assim, para obter o que foi agora referido, fez-se a seguinte manipulação algébrica:

$$\Delta P = 0.577v - 20.629 \times \frac{v}{|v|} + \frac{63.389}{v} \quad (4.10)$$

Considerando agora os termos $A = 0.577v$, $B = -20.629 \times \frac{v}{|v|}$ e $C = \frac{63.389}{v}$, vai-se agora observar a influência que têm agora os termos manipulados na equação do aerogerador:

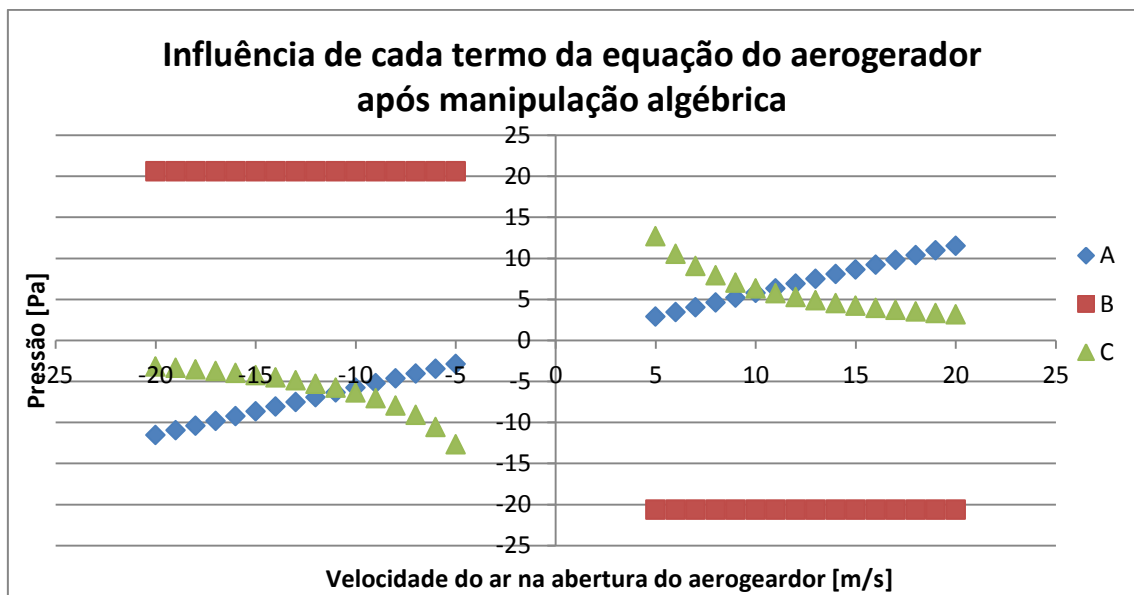


Figura 4.13- Influência de cada termo da equação do aerogerador após manipulação algébrica

Como se pretendia, após esta manipulação dos termos da equação, obtém-se a correcta diferença de pressões no aerogerador, representada no seguinte gráfico:

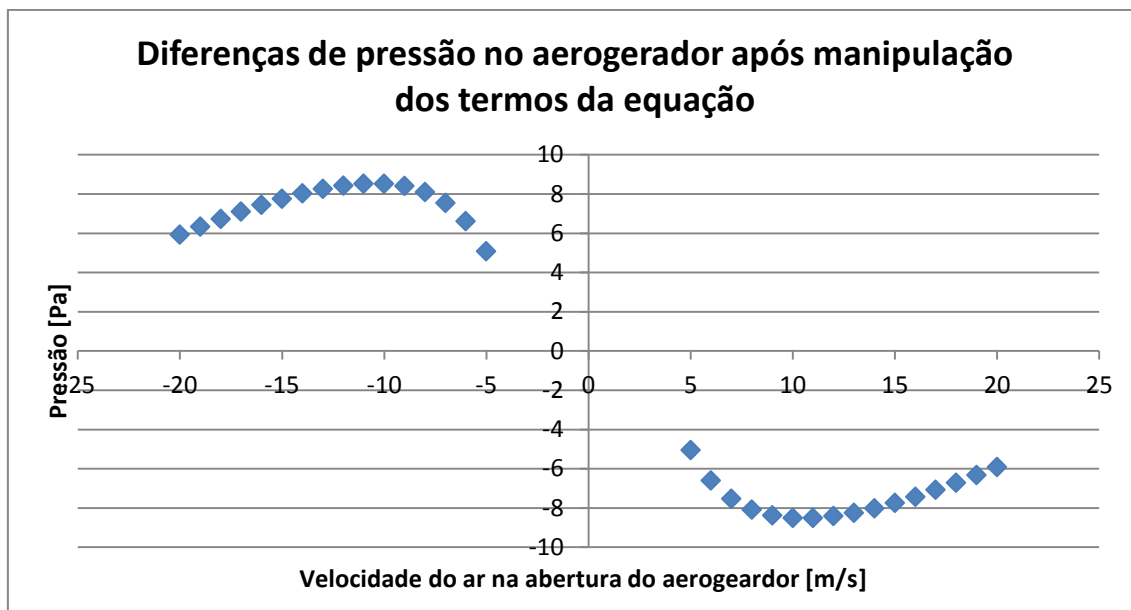


Figura 4.14- Diferenças de pressão no aerogerador após manipulação dos termos da equação

Como se pode observar, antes do aerogerador, representado a velocidade negativa, tem-se pressões positivas, ao passo que após o aerogerador, representado a velocidade positiva, existem pressões negativas.

Porém, há que ter em conta que o aerogerador apenas funciona a partir dos 4m/s, pelo que é necessário considerar uma perda de carga associada até essa velocidade ser atingida. Note-se que isto é válido no intervalo de velocidades de $[-4,4]$ m/s. Deste modo, para $v= 4$ m/s, tem-se:

$$\Delta P = -0.577 \times 4 + 20.629 - \frac{63.389}{4} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \Delta P = 2.474 \text{ Pa}$$

Como $\Delta P = \frac{1}{2} \rho \zeta v^2 \Leftrightarrow \zeta = \frac{2 \times \Delta P}{\rho v^2}$, e considerando $\rho_{ar} = 1.2922 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ vem que a perda de carga é:

$$\zeta = \frac{2 \times 2.474}{1.2922 \times 4^2} \Leftrightarrow \zeta = 0.2393$$

De modo a avaliar as potencialidades do aproveitamento energético do edifício, e sem outros recursos disponíveis, optou-se por considerar a colocação de n ventiladores em série, de modo a aproveitar toda a potencialidade que o vento tem para oferecer. Note-se que não está aqui a ser inventada nenhuma máquina ou tecnologia nova, apenas está a ser estudado se, de facto, há um possível aproveitamento energético do vento, ou não. Assim, modelou-se também as curvas para os casos em que se tem 5, 10, 15, 30 e 60 aerogeradores em série. As curvas, diferenças de pressão e as respectivas perdas de carga, necessárias para colocar no programa, são apresentadas resumidamente na seguinte tabela:

Tabela 4.1- Curvas de pressão, ΔP quando $v=4\text{m/s}$ e perdas de carga para diferentes aerogeradores em série

N.º de aerogeradores em série	Curva do aerogerador	ΔP quando $v=4\text{m/s}$	Perda de carga ζ
5	$P = -2.885v + 103.145 - \frac{316.945}{v}$	12.369	1.2578
10	$P = -5.77v + 206.29 - \frac{633.89}{v}$	24.74	2.516
15	$P = -8.655v + 309.435 - \frac{950.835}{v}$	37.115	3.774
30	$P = -17.31v + 618.87 - \frac{1901.67}{v}$	74.21	7.55
60	$P = -34.62v + 1237.74 - \frac{3803.34}{v}$	148.425	15.09

5. Resultados do caso de estudo

Existem vários valores de caudais mínimos de ar novo apresentados no Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril. Estes valores dependem do tipo de actividade exercida no referido espaço. Visto haver uma gama relativamente grande de valores de caudal mínimo necessário, vai-se admitir então o valor de $5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ que se adequa aos espaços de lojas de comércio e gabinetes, entre outros. Considerando que cada andar tem um pé direito de cerca de 3m, a área total em planta dos espaços é:

$$A_{\text{total em planta}} = 8 \times 592.3 = 4738.4 \text{ m}^2$$

Sendo o caudal mínimo de ar novo:

$$\text{Caudal minimo} = 4738.4 \text{ m}^2 \times 5 \frac{\text{m}^3}{\text{hm}^2} = 23692 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

O que corresponde a:

$$\frac{\text{Caudal minimo}}{\text{Volume}} = \frac{23682}{14807.1} = 1.6 \frac{\text{Renovações}}{\text{hora}}$$

5.1. Caso de estudo apenas com ventilação natural

De modo a analisar o comportamento do edifício, fez-se um estudo preliminar apenas com ventilação natural, isto é, sem que haja presença quer do ventilador, quer do aerogerador. Deste modo, na abertura entre a conduta e a chaminé, apenas se considera uma perda de carga igual à das restantes aberturas. As áreas das aberturas não são alteradas.

Neste ponto, o principal objectivo será verificar para que velocidade do vento o edifício é “auto-sustentável” no que toca às renovações do ar, visto que esta “velocidade limite” terá interesse mais à frente de modo a saber quando se poderá desligar o ventilador, e accionar o aerogerador. É também de interesse verificar a gama de velocidades presentes na abertura onde se vai inserir o ventilador/ aerogerador, uma vez que o aerogerador apenas funciona na gama de velocidades de 4 a 20 m/s.

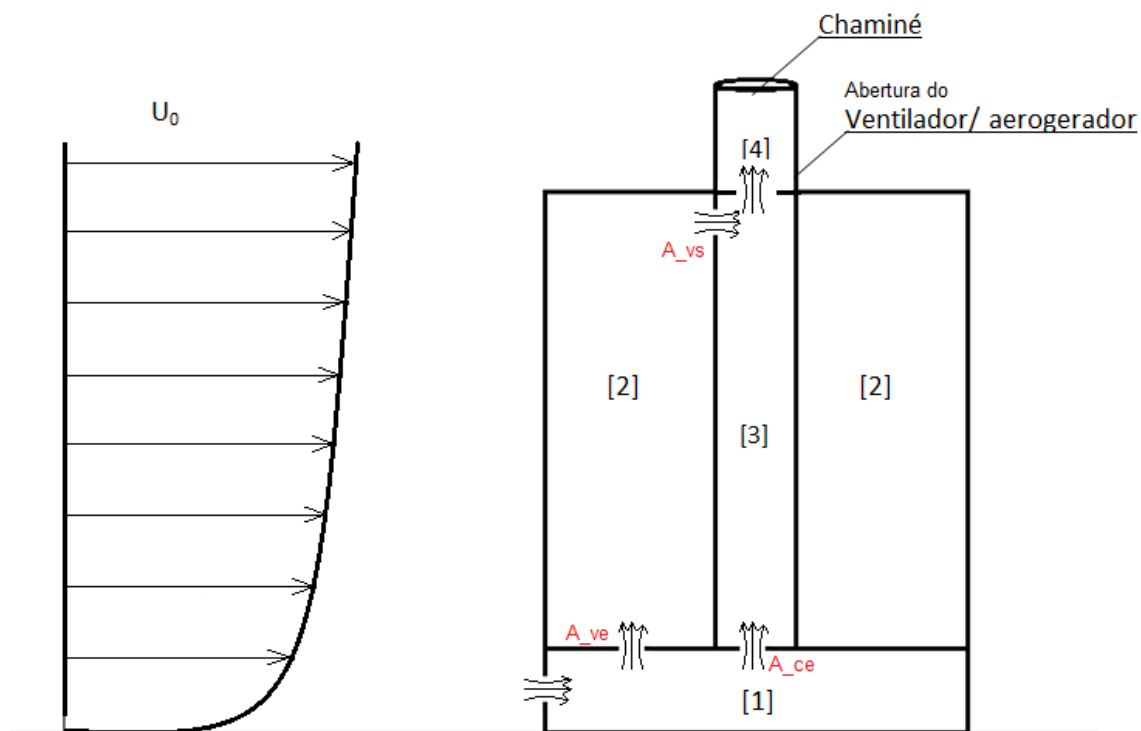


Figura 5. 1- Modelo do edifício apenas com ventilação natural, sem ventilador nem exaustor

Assim, para o edifício nas condições já referidas, a figura 5.2 mostra o gráfico da evolução do número de renovações de ar novo no espaço 2, função da velocidade do vento exterior, e a figura 5.2 descreve a evolução da velocidade na abertura onde se localiza o ventilador/aerogerador:

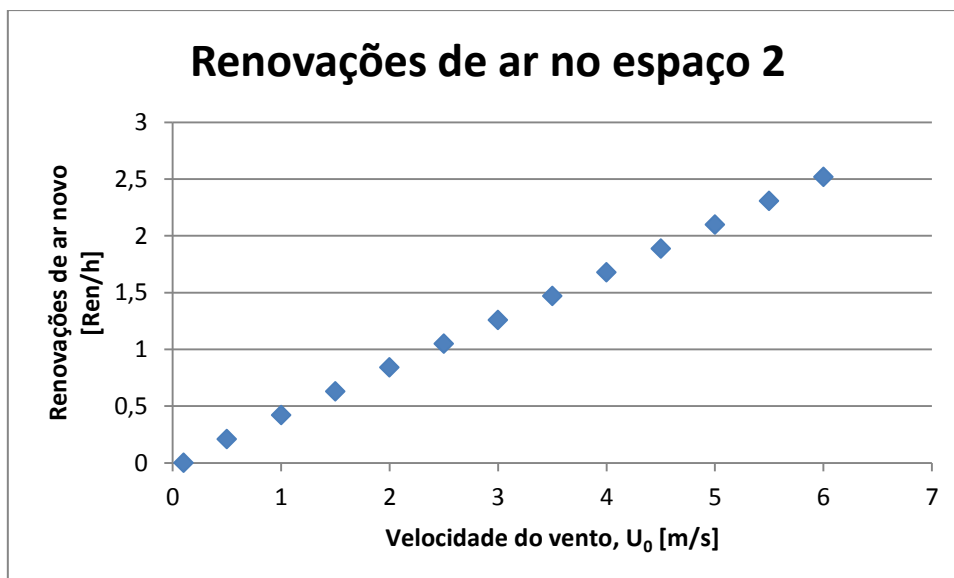


Figura 5.2- Evolução do número de renovações de ar no espaço 2, função da velocidade do vento, asseguradas apenas pela ventilação natural

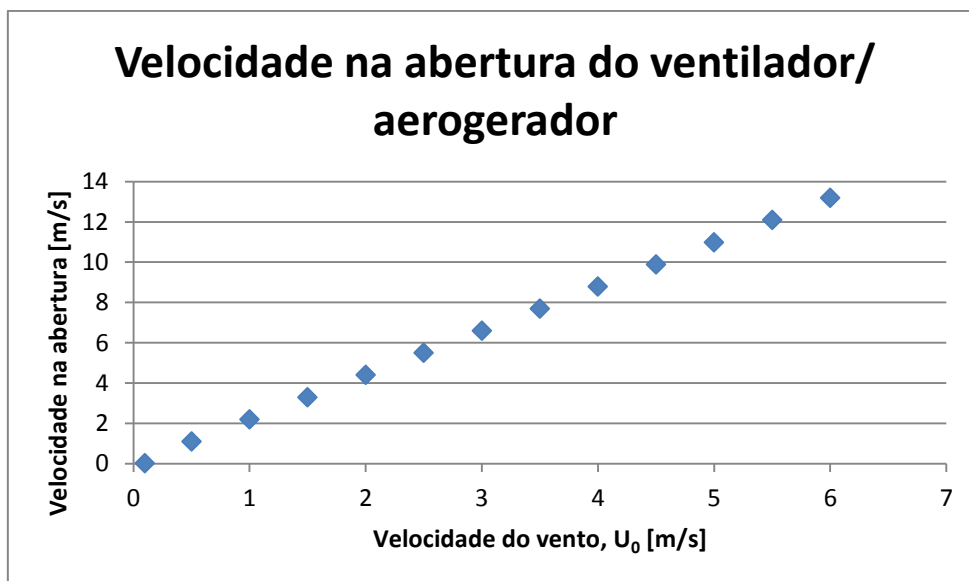


Figura 5.3- Evolução da velocidade na abertura do ventilador/aerogerador, função da velocidade do vento, apenas com ventilação natural

Como se pode verificar, as 1.6 renovações de ar novo por hora apenas são asseguradas pela ventilação natural quando o vento exterior atinge a velocidade de 4 m/s. Será então a esta velocidade do vento que o ventilador poderá ser desligado. Já o aerogerador apenas poderá ser accionado aos 4 m/s ou com uma velocidade do vento superior.

5.2. Caso de estudo com ventilação mista

Uma vez que as renovações mínimas de ar novo são imperativas para o bem-estar das pessoas no interior do edifício, quando o vento exterior não permite que estas sejam asseguradas, é necessário que a ventilação mecânica intervenha.

Assim, foi introduzido o ventilador de velocidade variável, já referido no capítulo 4, que assegurará a ventilação do espaço 2, em conjunto com o vento exterior (ventilação mista). O objectivo é manter a taxa de renovação constante em 1,6 renovações por hora, reduzindo a velocidade de rotação do ventilador à medida que a velocidade do vento aumenta. Neste ponto as áreas das aberturas também não são alteradas.

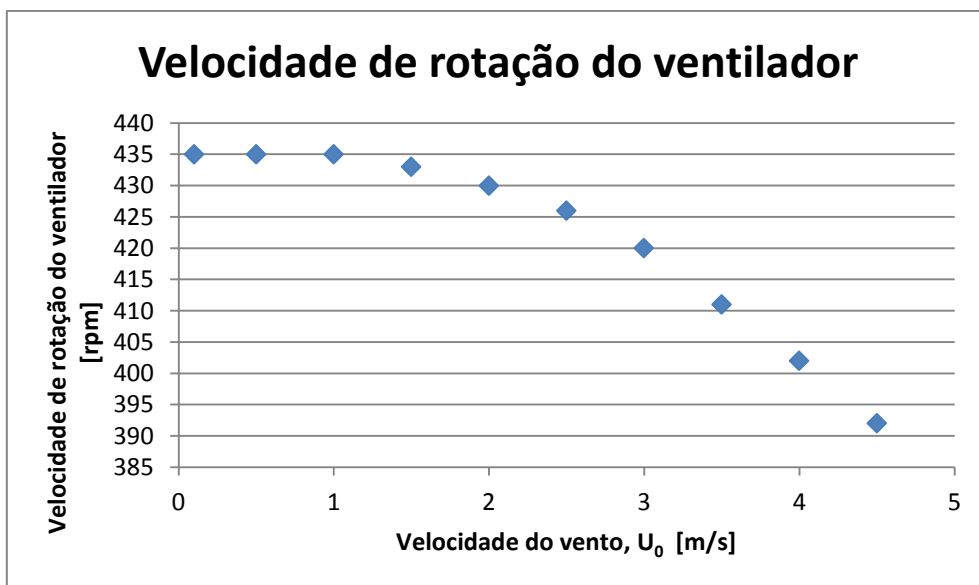


Figura 5.4 - Variação da velocidade de rotação do ventilador, função da velocidade do vento

No gráfico da figura 5.4 pode-se observar a variação da velocidade de rotação do ventilador, função da velocidade do vento. O que se pode concluir aqui, e olhando para os gráficos do catálogo, é que este ventilador está sobre-dimensionado para o edifício em estudo, uma vez que assegura as renovações de ar novo necessárias a velocidades de rotação relativamente baixas. No gráfico da figura 5.6 pode ser observada a potência consumida pelo ventilador.

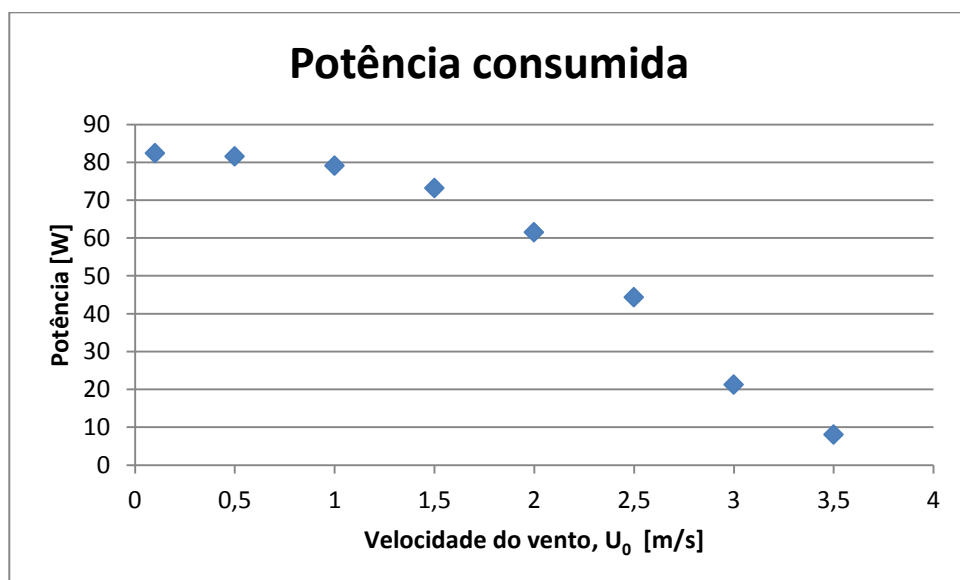


Figura 5.5 - Potência consumida pelo ventilador, função da velocidade do vento

5.3. Caso de estudo com a introdução de aerogerador

Uma vez ultrapassada a fase em que o edifício não é auto-sustentável em termos de renovação de ar novo, pode então ser introduzido um ou mais aerogeradores em série, para produção de energia eléctrica. A ideia é manter as renovações dentro do espaço 2 constantes, nas 1.6 renovações/hora. Para o efeito, as áreas das aberturas de ventilação foram progressivamente reduzidas (A_{ve} e A_{vs}), ao passo que a área da abertura de entrada da conduta (A_{ce}) foi progressivamente aumentada.

Note-se que o facto de os aerogeradores serem colocados em série não significa que isto acontecesse na realidade, pretendendo-se apenas determinar a quantidade de potência que se consegue retirar do edifício. Assim, nos seguintes subcapítulos, serão analisados os casos para 1, 5, 10, 15, 30 e 60 aerogeradores em série, nunca esquecendo que o aerogerador apenas opera no intervalo de velocidades de 4 a 20 m/s na sua abertura.

Para tal, serão apresentados os gráficos do número de renovações de ar novo, da velocidade na abertura do aerogerador, da variação das pressões nos espaços 3 e 4 (conduta central e chaminé, respectivamente), da variação das áreas das aberturas e, por fim, da potência produzida.

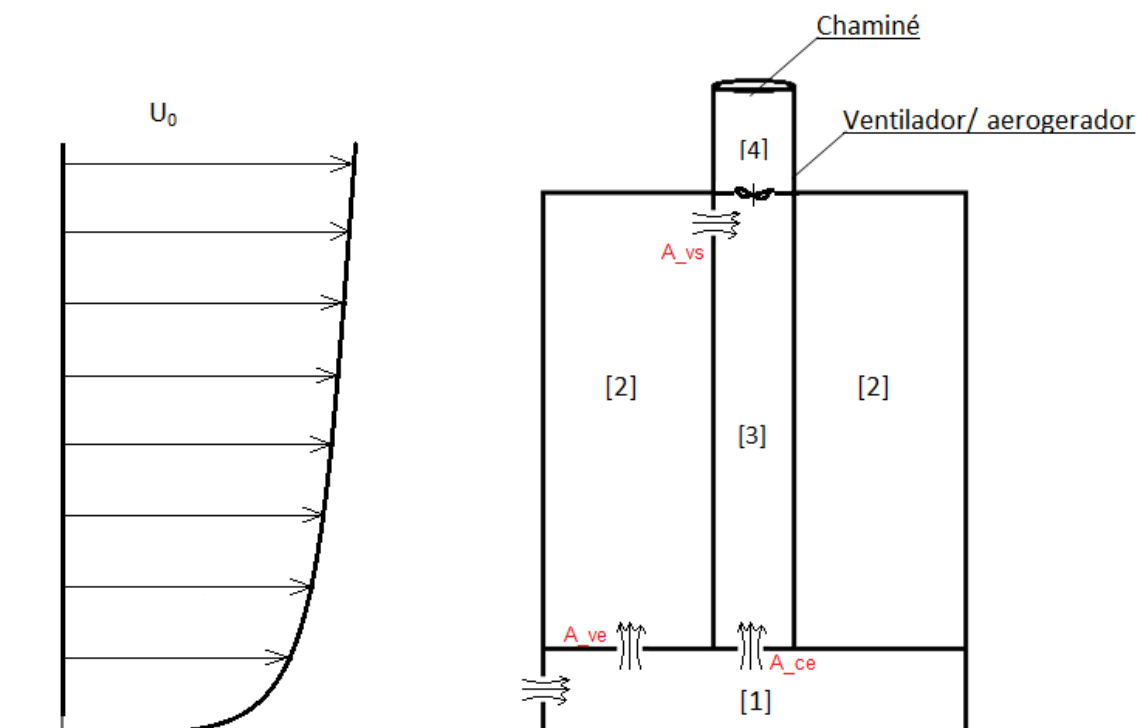


Figura 5. 6- Modelo do edifício

Um aerogerador

Começou-se pela introdução de apenas um aerogerador, de modo a ver como o edifício reagia, e também para avaliar quanta potência se conseguia retirar, para velocidades do vento baixas.

Após as primeiras iterações, o que se verificou é que devido a introdução do aerogerador, as renovações não ficavam asseguradas pelo vento aos 4m/s, mas sim aos 4.5 m/s. Isto acontece porque, aquando da introdução do aerogerador, existe uma perda de carga associada.

O gráfico da figura 5.7 torna-se importante por duas razões: primeiro porque permite verificar a gama de velocidades em que o aerogerador está a operar, uma vez que este apenas opera no intervalo de 4 a 20 m/s; segundo vai permitir calcular, mais a frente, a potência consumida.

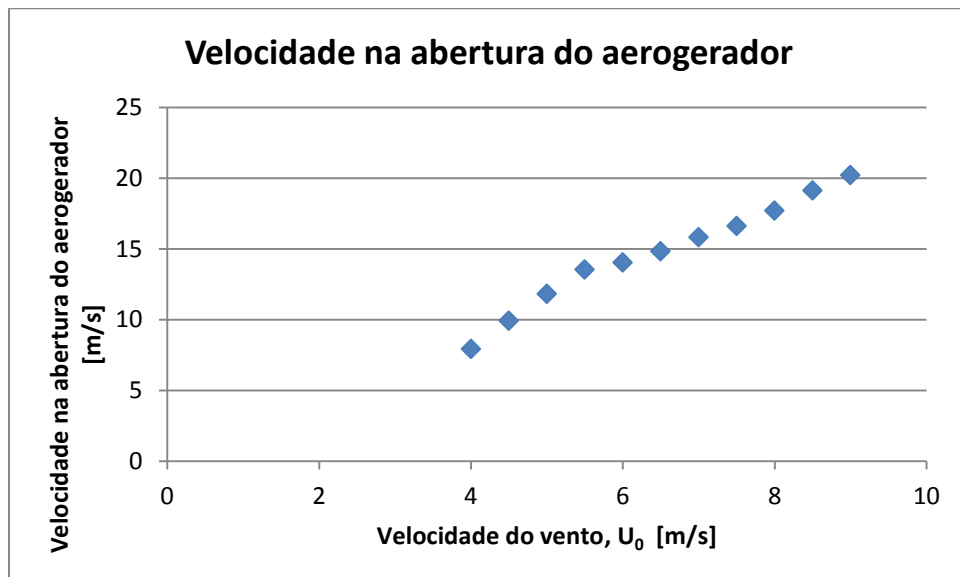


Figura 5.7 - Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura do aerogerador, função da velocidade do vento, com um aerogerador

Também a variação das pressões interiores nos espaços 3 e 4 é um ponto importante. Estes valores são não só de grande importância para o cálculo da potência consumida, como também para verificar se não existem anomalias nas simulações efectuadas.

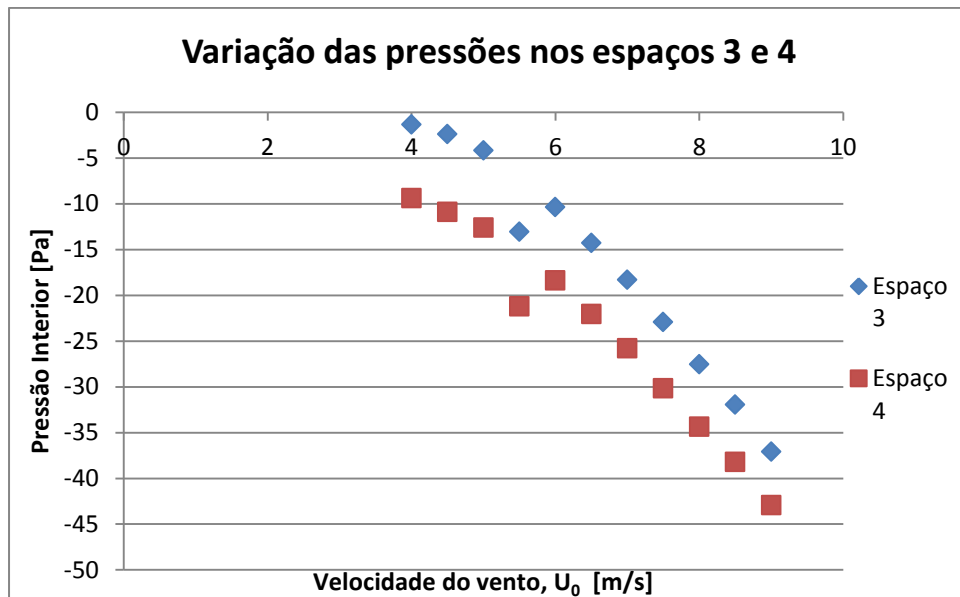


Figura 5.8 - Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com um aerogerador

Como se pode observar, quando a velocidade é de 5.5 m/s, existe uma queda maior do que o esperado nas pressões dos espaços 3 e 4. Isto deve-se ao facto de uma das aberturas ter sido fechada mais rapidamente, como se pode ver no gráfico da figura 5.9.

Também a variação das áreas das aberturas é um ponto importante, de modo a calcular a potência consumida. A escolha certa destas áreas vai influenciar a velocidade na abertura do aerogerador, que influencia o seu funcionamento.

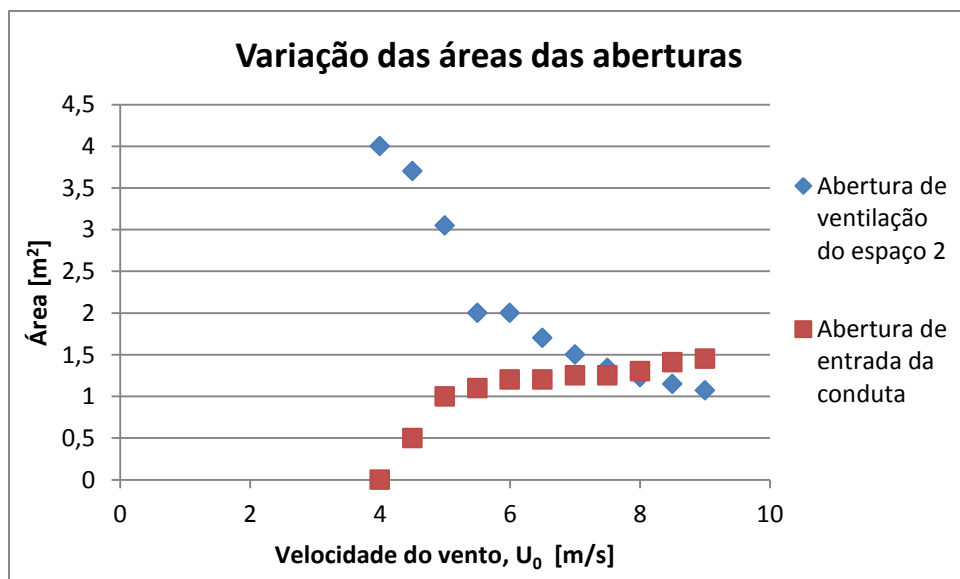


Figura 5.9 - Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com um aerogerador

Tendo os dados das diferenças de pressão entre os espaços 3 e 4, a velocidade na abertura e a sua respectiva área (0.785 m^2), e sabendo que $\text{Potência} = \Delta P \times A \times v$, consegue-se então obter uma curva da potência produzida, função da velocidade do vento. Esta curva é demonstrada no gráfico da figura 5.10.

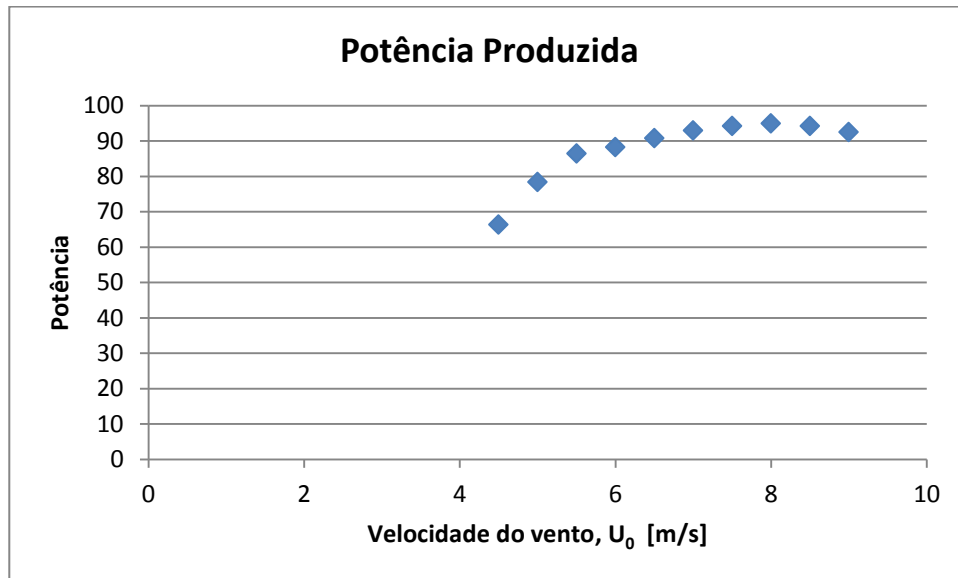


Figura 5.10 - Potência produzida por um aerogerador, função da velocidade do vento

Como se pode observar, o aerogerador funciona apenas para uma baixa gama de velocidades do vento (4.5 a 9 m/s), devido a limitação de velocidade no aerogerador imposta pela sua curva de potência, de 20 m/s. Deste modo, nos seguintes subcapítulos vão ser colocados aerogeradores em série, de modo a se conseguir subir para um intervalo de velocidades do vento mais elevadas, determinando então as potencialidades energéticas nessa gama de velocidades, mantendo a velocidade na abertura dos aerogeradores na gama de 4 a 20 m/s.

Cinco aerogeradores em série

Com a introdução de 5 aerogeradores em série, fez-se o mesmo procedimento que no subcapítulo 5.3.1. Assim, as 1.6 renovações de volume de ar novo foram impostas, e a partir daí obtiveram-se os restantes resultados.

Note-se que a faixa de velocidades que o conjunto de 5 aerogeradores opera está agora no intervalo de 6.5 m/s a 8.5 m/s. Isto deve-se ao facto da presença do conjunto de aerogeradores acrescentar uma maior perda de carga à abertura, obstruindo mais a passagem do ar do que apenas com um aerogerador. Isto faz com que a velocidade na

abertura seja menor, para a mesma velocidade do vento, à medida que se vão adicionando aerogeradores em série.

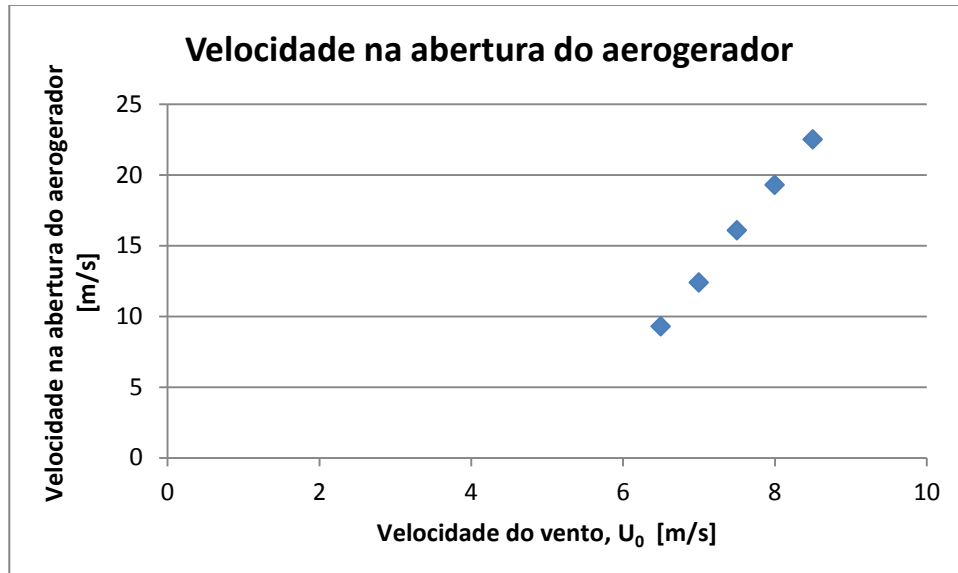


Figura 5.11 - Variação da velocidade de escoamento do ar na abertura do aerogerador, função da velocidade do vento, com cinco aerogeradores em série

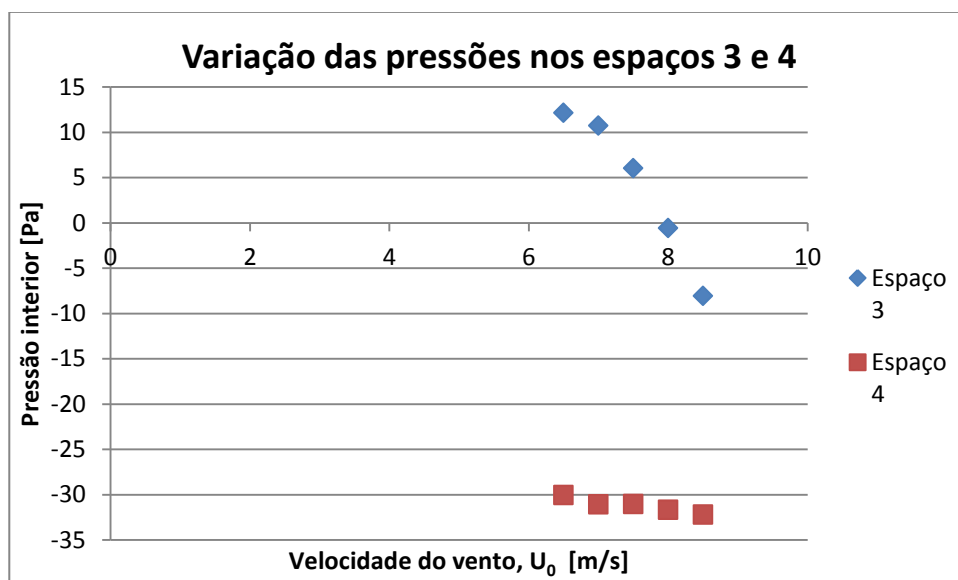


Figura 5.12 – Variação das pressões no interior dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com cinco aerogeradores em série

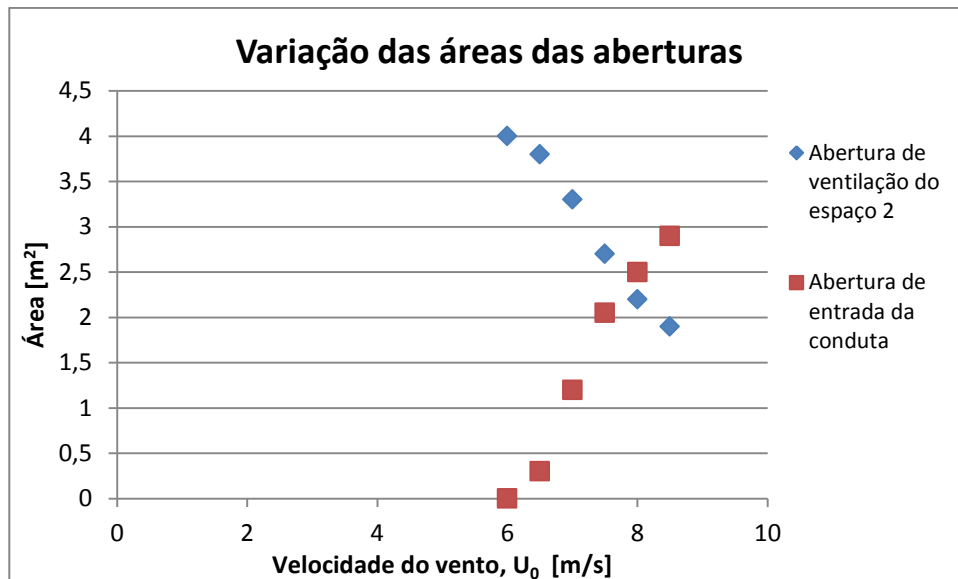


Figura 5.13 – Variação da área das aberturas, função da velocidade do vento, com 5 aerogeradores em série

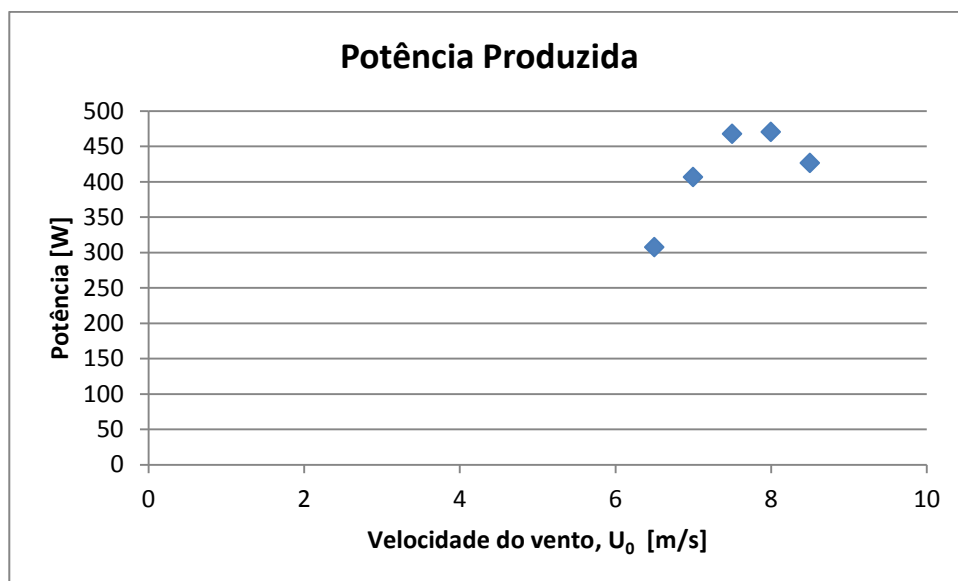


Figura 5.14 – Potência produzida pelos cinco aerogeradores em série, função da velocidade do vento

Nesta situação já é visível um claro aumento da potência produzida, numa gama de velocidades também mais alta. Tal irá também ser verificado nos subcapítulos seguintes.

Dez aerogeradores em série

No seguimento do que tem vindo a ser feito, estuda-se agora o caso em que se teriam dez aerogeradores em série. Assim, mantiveram-se as 1.6 renovações mínimas de ar novo

no espaço habitado. Algo que se pode observar é que a gama de velocidades tende ficar mais curta com o aumento do número de aerogeradores em série. Tentou-se contornar esse aspecto através da escolha das áreas das aberturas, de modo a que não só as renovações mínimas de ar novo fossem estabelecidas o mais rápido possível, mas também que a velocidade de 20 m/s na abertura do aerogerador não fosse atingida tão rapidamente. Os resultados são apresentados então nas seguintes representações gráficas.

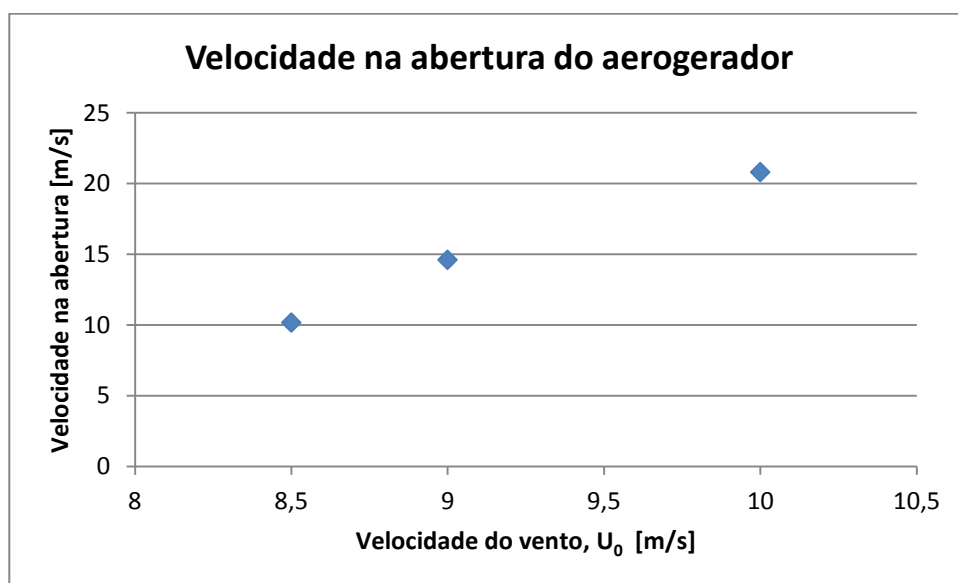


Figura 5.15 – Variação da velocidade na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com dez aerogeradores em série

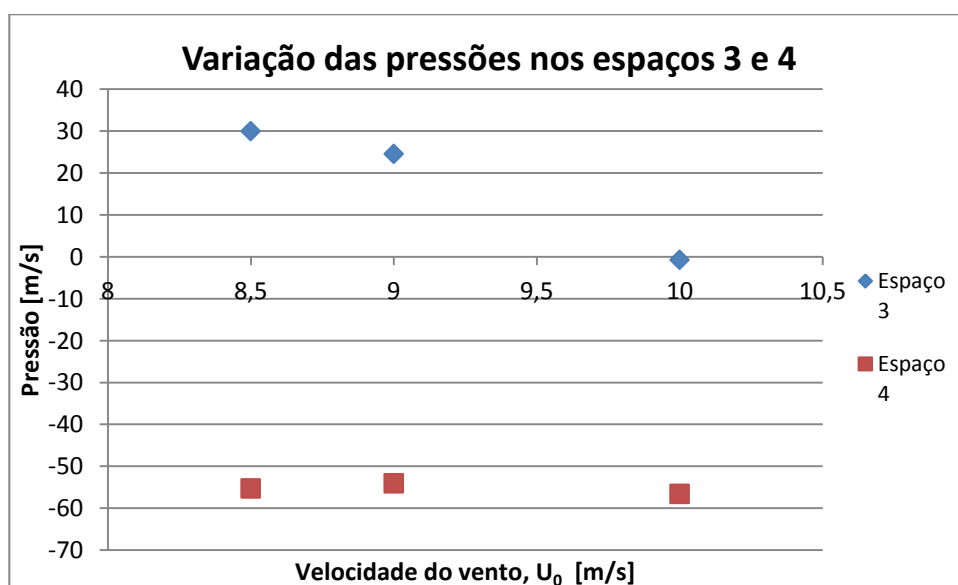


Figura 5.16 – Variação das pressões interiores dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com dez aerogeradores em série

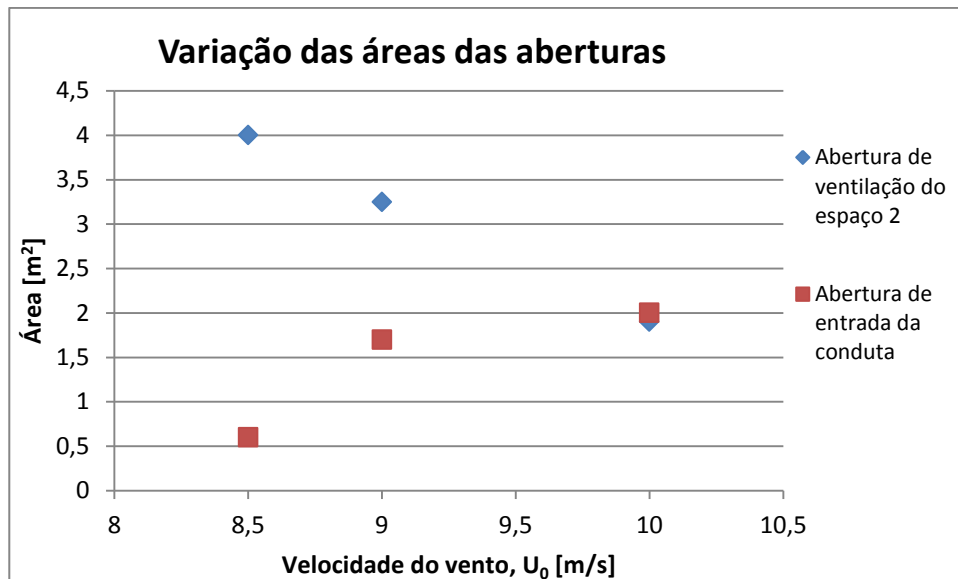


Figura 5.17- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com dez aerogeradores em série

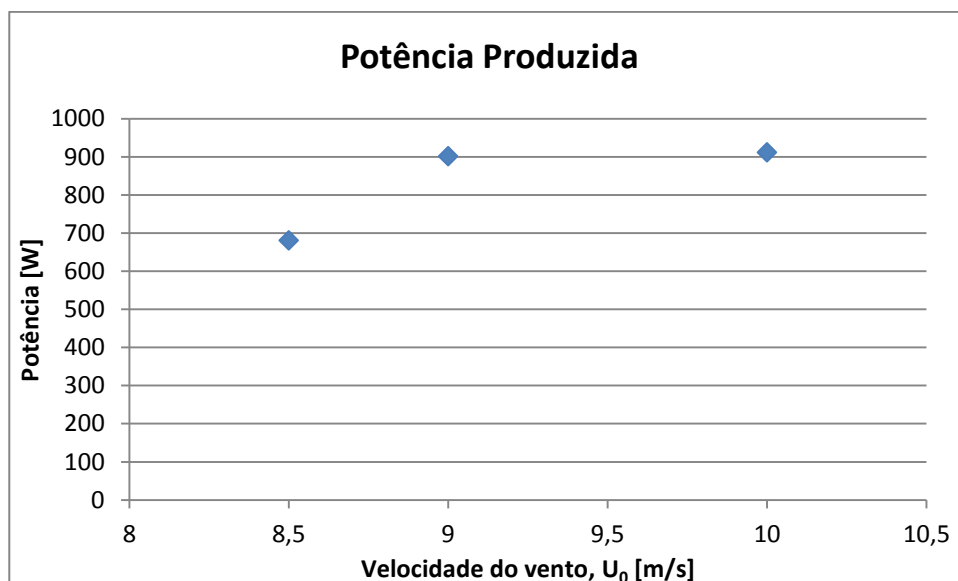


Figura 5.18 – Potência produzida pelos dez aerogeradores em série, função da velocidade do vento

Novamente tanto a potência como a gama de velocidades aumentaram, apesar desta última, como já foi explicado no início do capítulo, ser bastante reduzida.

Quinze aerogeradores em série

Analogamente ao que tem vindo a ser feito, nesta secção faz-se o estudo para a introdução de quinze aerogeradores em série. Houve uma grande preocupação em tentar alongar a gama de velocidades do vento em que o aerogerador funcionava, pelo que neste caso esta é mais longa, como poderemos ver nos seguintes gráficos das figuras 5.21 a 5.25.

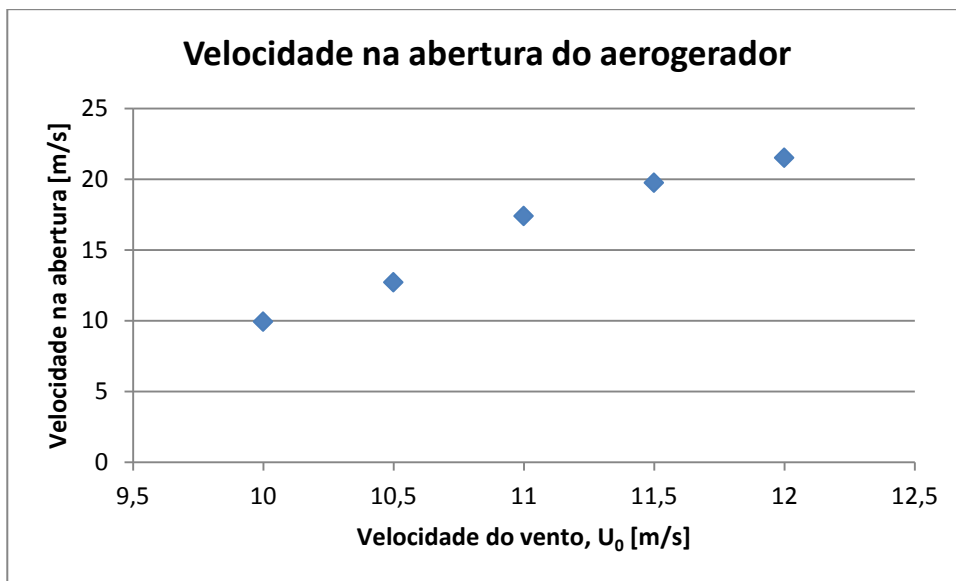


Figura 5.19 – Velocidade na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com quinze aerogeradores em série

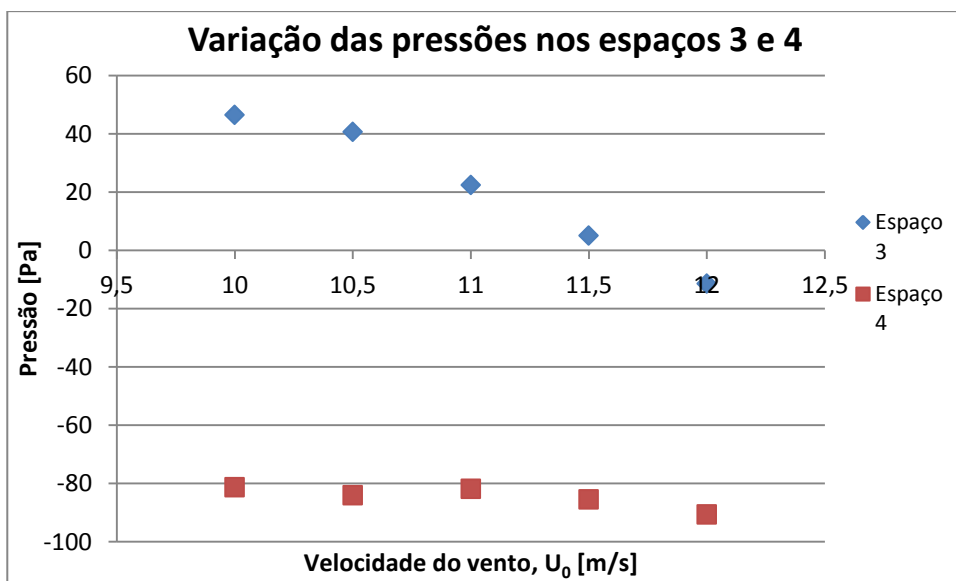


Figura 5.20 – Variação das pressões interiores dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com quinze aerogeradores em série

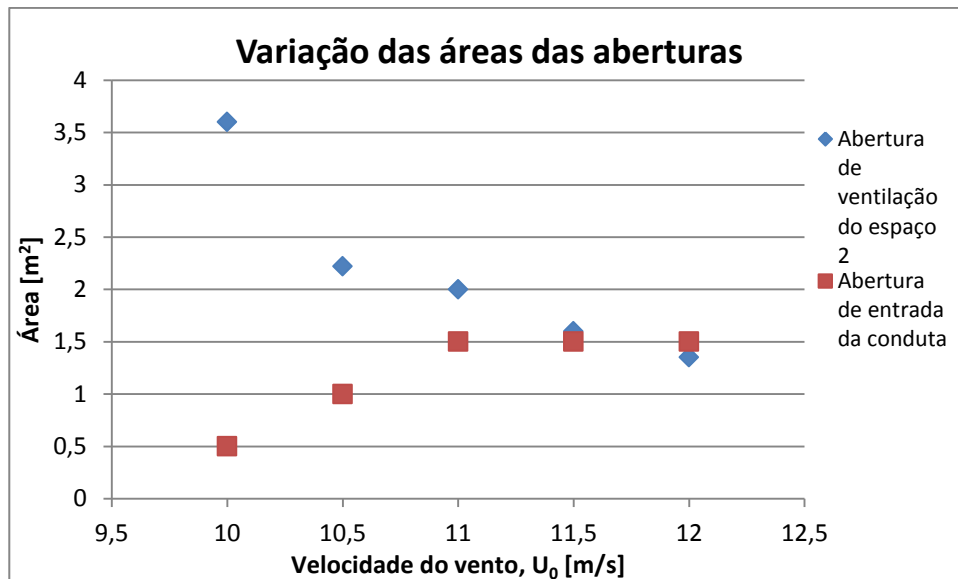


Figura 5.21- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com quinze aerogeradores em série

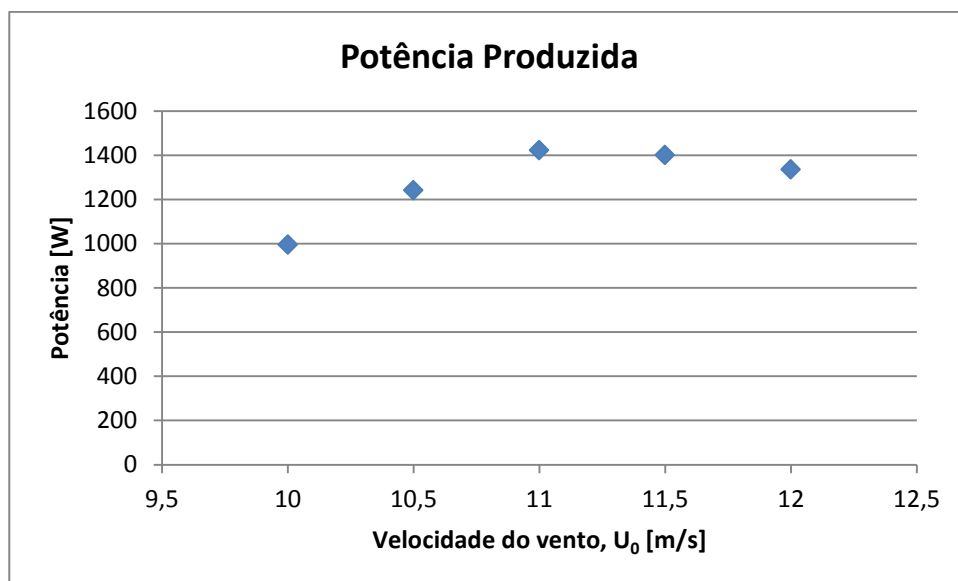


Figura 5.22- Potência produzida pelos quinze aerogeradores em série, função da velocidade do vento

Como foi possível observar, a gama de velocidades neste caso foi mais alta, pelo que foi necessário reduzir um pouco mais a abertura de ventilação do espaço 2, devido a intensidade do vento. Naturalmente, também a potência produzida foi maior, como era esperado.

Trinta aerogeradores em série

Na mesma linha de raciocínio do que tem vindo a ser feito, neste subcapítulo estudam-se as potencialidades energéticas da ventilação natural do edifício com a colocação de trinta aerogeradores em série na abertura entre o espaço 3 e 4.

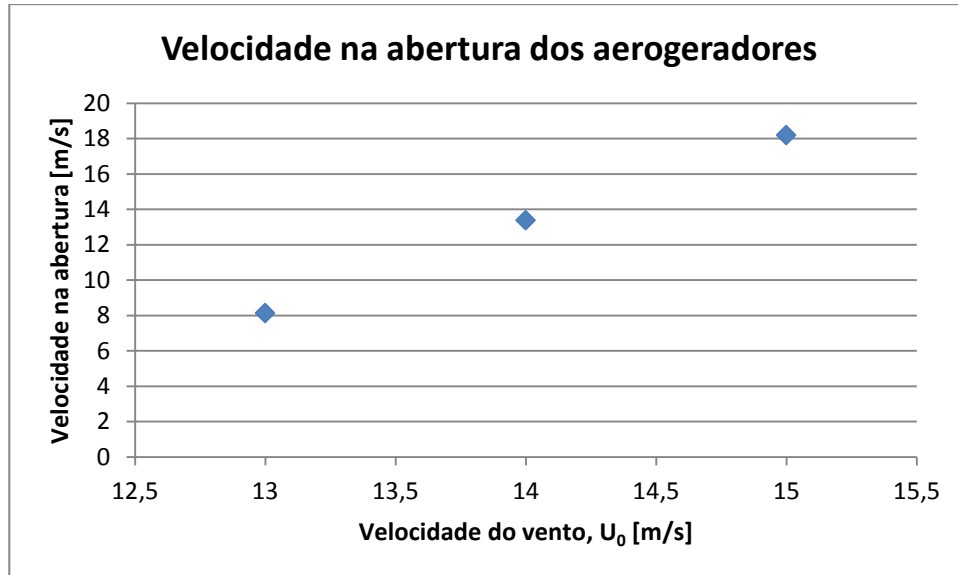


Figura 5. 23- Velocidade na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com trinta aerogeradores em série

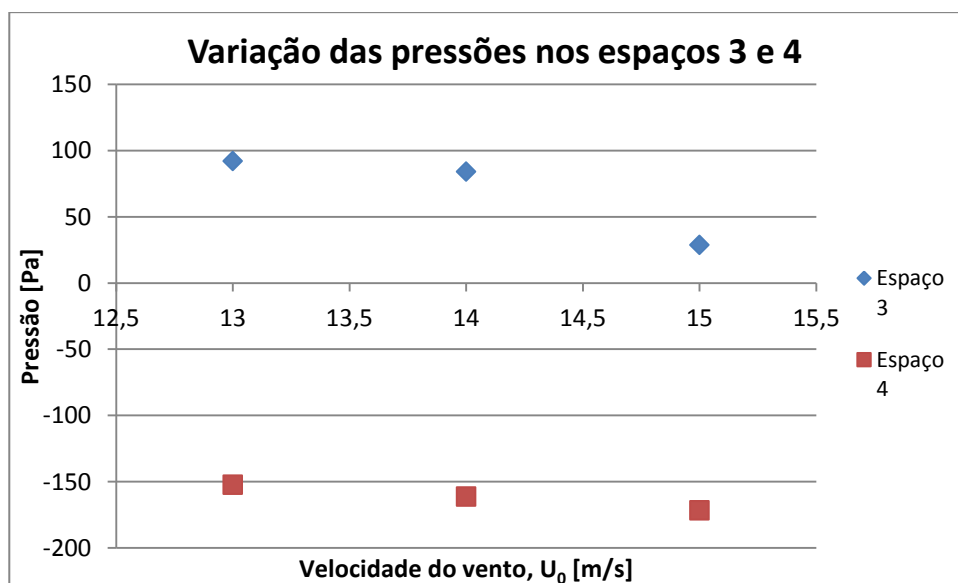


Figura 5. 24- Variação das pressões interiores dos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com trinta aerogeradores em série

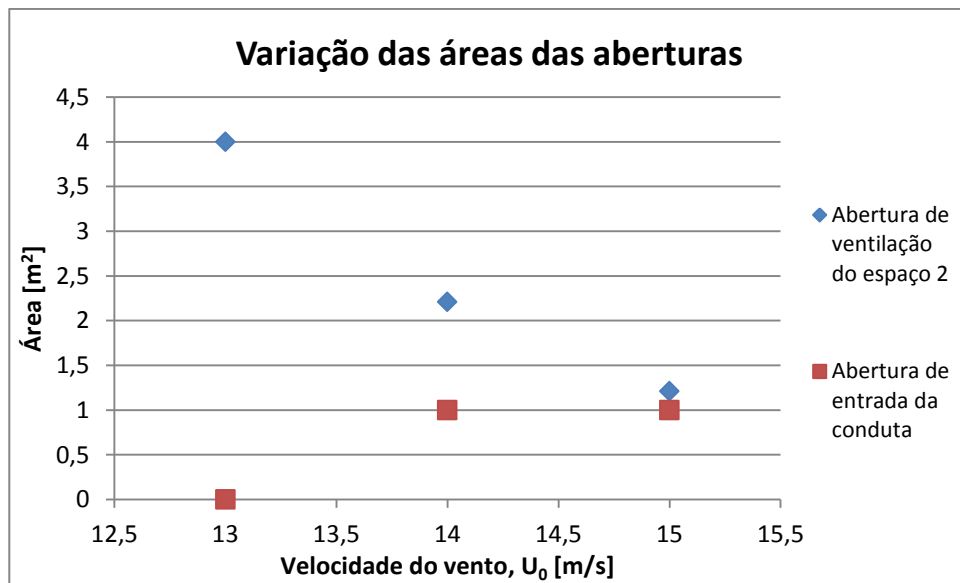


Figura 5. 25- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com trinta aerogeradores em série

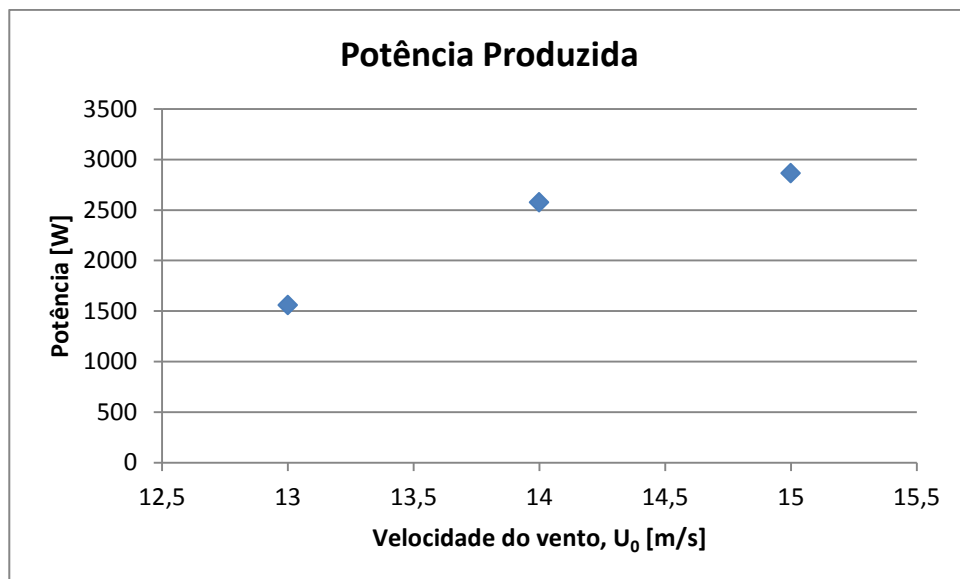


Figura 5. 26- Potência produzida pelos trinta aerogeradores em série, função da velocidade do vento

Como tendência, a gama de velocidades do vento em que os aerogeradores conseguem operar é mais curta, mas também de maior intensidade. Consegue-se agora retirar uma potência consideravelmente maior (passou-se de 15 para 30 aerogeradores).

Sessenta aerogeradores em série

No último caso de estudo, aumentou-se o número de aerogeradores em série para sessenta. Este é um caso limite, para conseguir avaliar as potencialidades da ventilação natural a velocidades do vento muito elevadas- até 20 m/s. Decidiu-se fazer o estudo até esta velocidade, uma vez que era o limite da gama de velocidades que normalmente ocorriam na gama de Lisboa. Este vai ser um tema mais desenvolvido no capítulo 5.4.

Por agora, continua-se com o seguimento do que tem sido feito ao longo dos últimos subcapítulos: manutenção das 1.6 renovações horárias, através regulação das aberturas de ventilação do espaço 2 e de entrada da conduta.

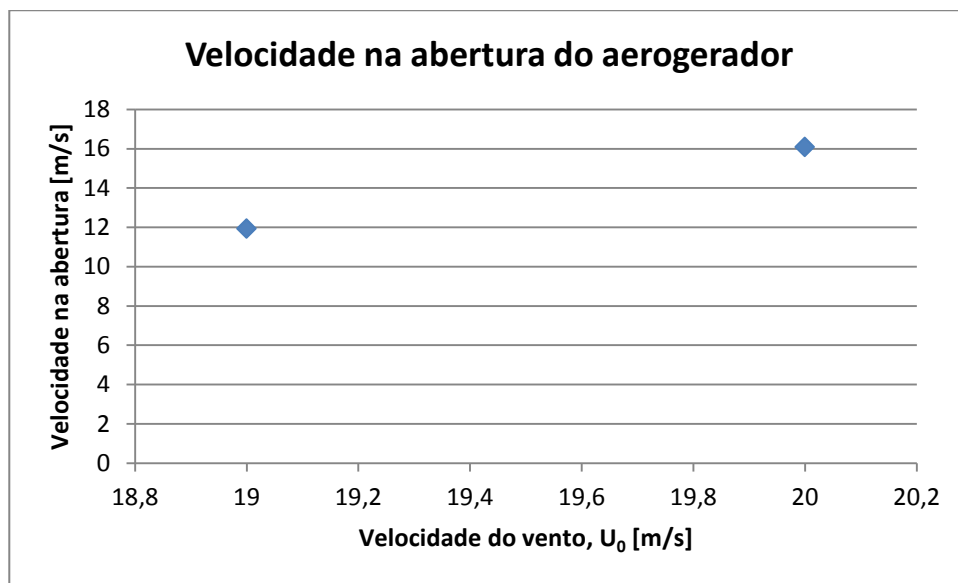


Figura 5. 27- Velocidade na abertura dos aerogeradores, função da velocidade do vento, com sessenta aerogeradores em série

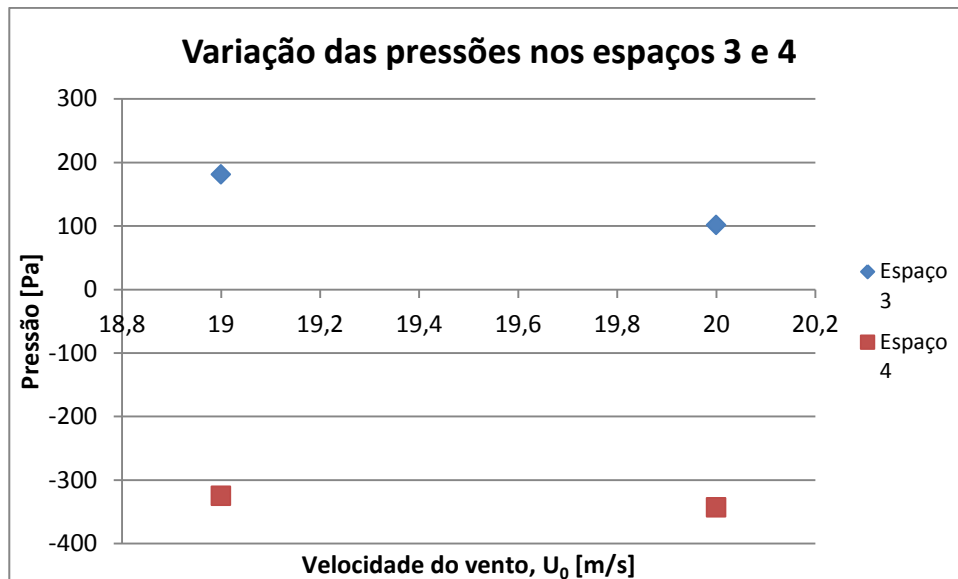


Figura 5. 28- Variação das pressões interiores nos espaços 3 e 4, função da velocidade do vento, com sessenta aerogeradores em série

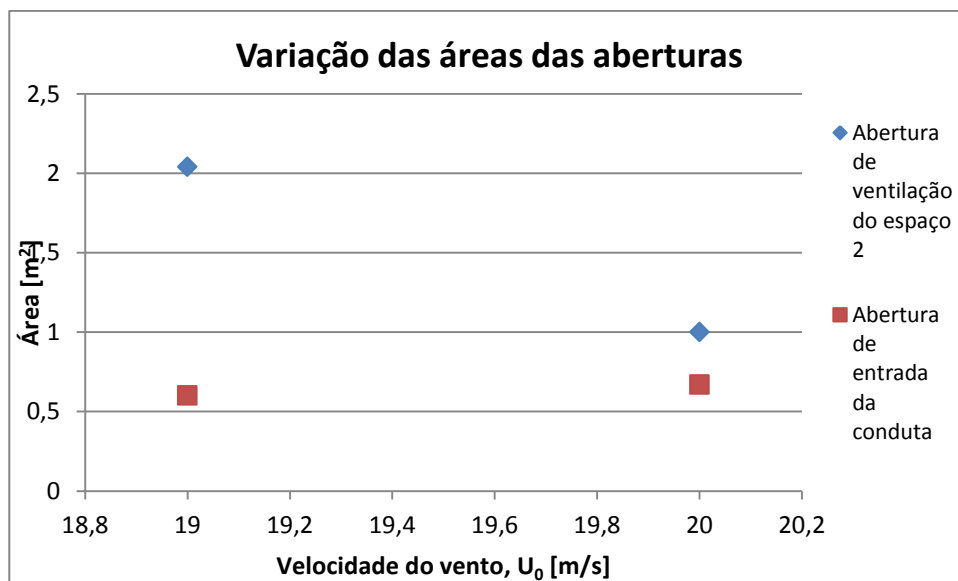


Figura 5. 29- Variação das áreas das aberturas, função da velocidade do vento, com sessenta aerogeradores em série

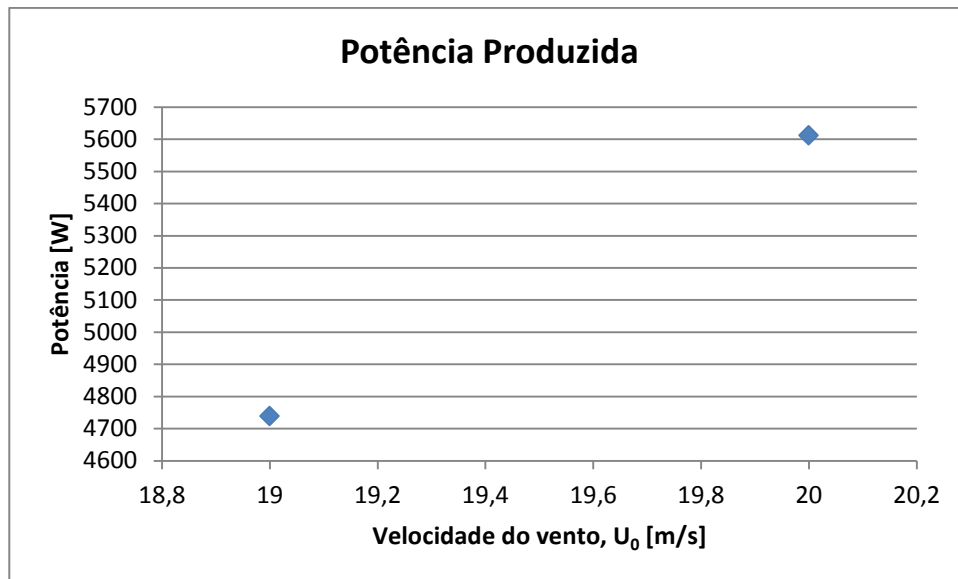


Figura 5. 30- Potência produzida pelos sessenta aerogeradores em série, função da velocidade do vento

Esta foi a última simulação executada, uma vez que já se conseguiu um valor para a potência produzida pelos aerogeradores a uma velocidade do vento de 20 m/s. Note-se que nesta última simulação, apenas se conseguiram valores para o intervalo de velocidades de 19 m/s a 20 m/s- gama de velocidades maior, e intervalo mais pequeno, como tem vindo a ser tendência. Pode-se concluir neste ponto que, para velocidades do vento de 20 m/s, é possível retirar 5.6 MW.

5.4. Análise dos resultados obtidos

Como já foi referido, o facto de se ter feito o estudo para a introdução de n aerogeradores em série não significa que isto seja feito na prática, ou que se esteja aqui a inventar algum mecanismo para que tal seja feito. O que foi feito foi analisar as potencialidades energéticas do edifício quanto à ventilação natural, com as ferramentas que estavam à disposição. Assim, de modo a perceber qual a potência que consegue ser retirada função da velocidade do vento, combinaram-se todos os resultados obtidos para as potências ao longo das simulações e combinaram-se do seguinte modo:

Tabela 5. 1- Potência produzida (Watt) por cada conjunto de aerogeradores em série, a uma determinada velocidade do vento

Aerogeradores em série U_0 [m/s]	Um	Cinco	Dez	Quinze	Trinta	Sessenta	Melhor valor
4	50,2						50,2
4,5	66,3						66,3
5	78,4						78,4
5,5	86,5						86,5
6	88,3	231,1					231,1
6,5	90,8	307,5					307,5
7	93,0	406,3					406,3
7,5	94,3	467,5					467,5
8	95,0	470,5					470,5
8,5	94,3	426,3	680,5				680,5
9	92,5		901,0				901,0
10			911,2	994,7			994,7
10,5				1242,1			1242,1
11				1423,1			1423,1
11,5				1401,2			1401,2
12				1335,4			1335,4
13					1559,3		1559,3
14					2575,4		2575,4
15					2864,4		2864,4
19						4738,0	4738,0
20						5611,9	5611,9

Com a escolha do melhor valor de potência para cada velocidade do vento, consegue-se então ter uma ideia da evolução da curva de potência que se consegue retirar do edifício.

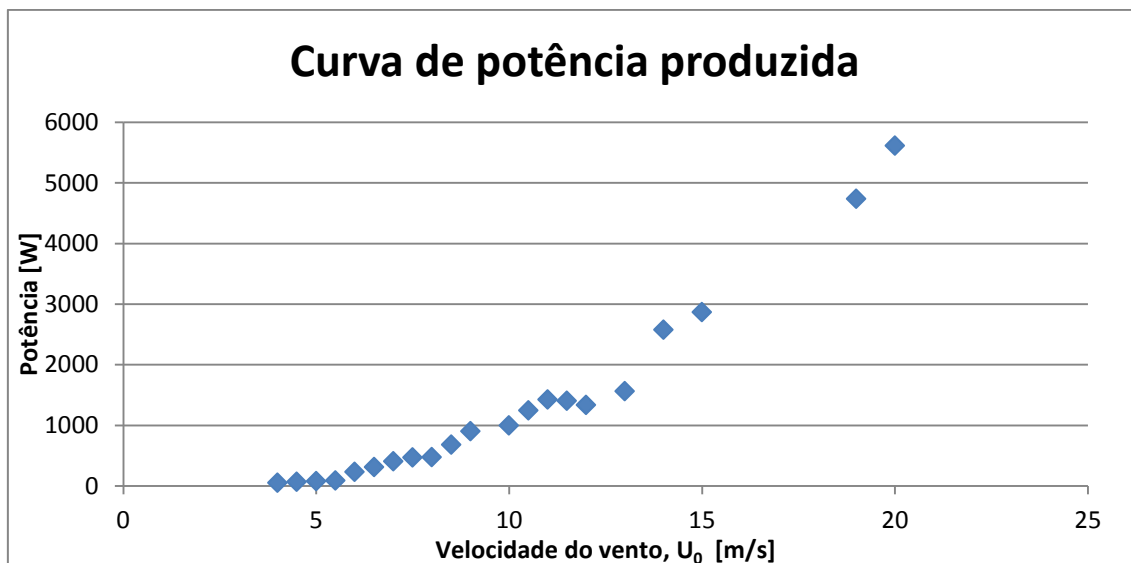


Figura 5. 31- Curva de potência produzida no edifício, função da velocidade do vento

Ainda mais importante, é necessário observar que existe um intervalo em que o edifício não está a produzir energia, mas sim a gastá-la. Pode-se ver esse efeito agora, no gráfico da figura 5.37, em que a potência consumida está representada a negativo, e a potência produzida está positiva.

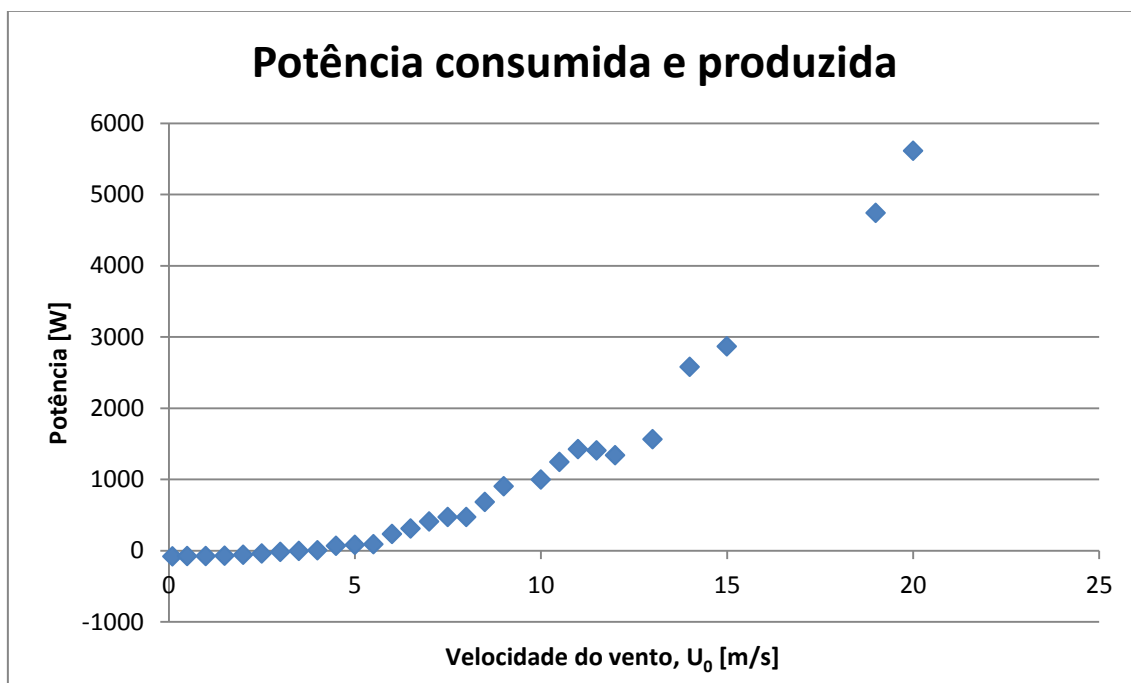


Figura 5. 32- Potência consumida (negativa) e produzida (positiva) no edifício, função da velocidade do vento

Porém, para uma melhor percepção das potencialidades energéticas do edifício, torna-se mais clara uma análise da energia consumida e produzida por ano. Assim, sabe-se que:

1 ano = 31 536 000 segundos

1 Watt = 1 Joule / segundo

Vem que: 1 W = 31 536 000 Joule/ ano. Neste sentido, multiplicando os valores do gráfico da figura 5.34 por 31,536 000 s, tem-se o valor da energia que pode ser produzida/ consumida por ano, em MJ/ano, para cada classe de velocidade, que na realidade corresponde à potência do gráfico 5.33, apenas com unidades diferentes.

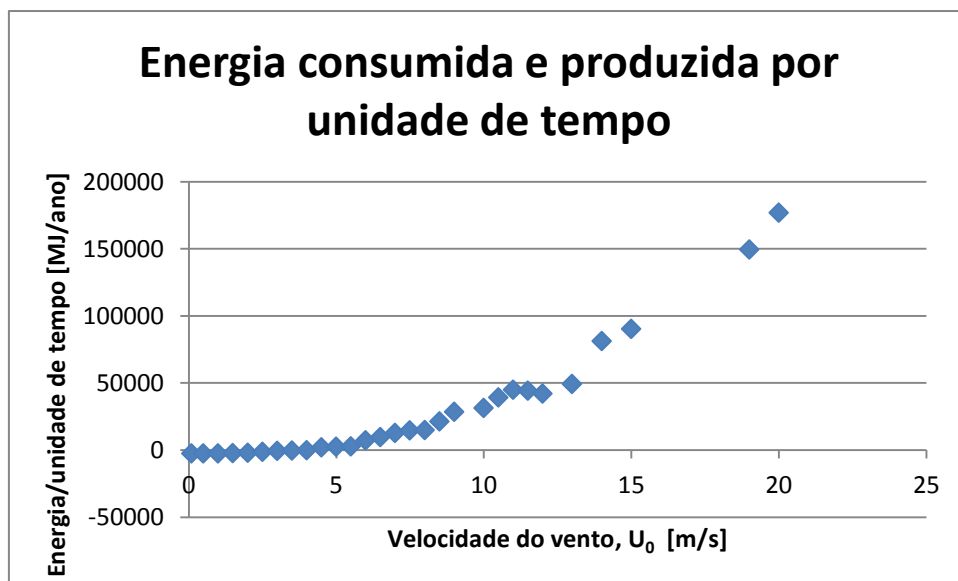


Figura 5. 33- Energia que pode ser consumida/ produzida, para cada classe de velocidade, por ano

Porém, há que ter em conta que, ao longo do ano, numa determinada localização, a intensidade do vento varia, havendo mais probabilidade de ocorrerem determinadas velocidades do vento do que outras. Deste modo, o gráfico anterior pode dar a ideia errada de que se vai estar quase sempre a produzir energia eléctrica, o que não transmite a realidade, uma vez que é muito mais comum a ocorrência de velocidades da gama média-baixa (ventos moderados ou calmos), do que ventos de intensidade ciclónica. Este tema será abordado com mais detalhe no seguinte subcapítulo 5.4.1.

5.4.1. Distribuição da intensidade do vento na região de Lisboa

É de elevada importância a localização do edifício, uma vez que é esta que vai determinar a quantidade de vento que este vai receber e, consequentemente, toda a energia que se gasta/produz devido à ventilação.

Uma forma de caracterizar o vento local é recorrer a leis de distribuição de classes de vento. Uma das funções de distribuição frequentemente utilizadas para o recurso eólico é a distribuição de Weibull. A distribuição de Weibull é feita à custa de dois parâmetros, k e A (Costa, 2004), parâmetros de forma e de escala, respectivamente. Esta distribuição dá uma representação estatística razoável daquela que é a distribuição da velocidade instantânea do vento ao longo do ano. A lei de distribuição de Weibull pode ser expressa pela seguinte expressão (Vaz, 2008):

$$p(u) = ku^{k-1}A^{-k} \exp \left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k \right] \quad (5.1)$$

Sendo que $p(u)$ é uma função densidade probabilidade:

$$\int_0^{\infty} p(u) du = 1 \quad (5.2)$$

Assumindo $k=2$, valor representativo das condições em Portugal
 $\left\{ \begin{array}{l} A = 1.125\bar{u}, \text{ com } \bar{u} = 16.9 \frac{km}{h} = 4.7 \frac{m}{s} \text{ para a região de Lisboa (Instituto} \\ \text{Português de Meteorologia),} \end{array} \right.$

Tem-se então a seguinte distribuição de Weibull, também chamada de Rayleigh (caso particular da distribuição de Weibull com $k=2$), para a frequência de ocorrência de velocidades do vento na região de Lisboa:

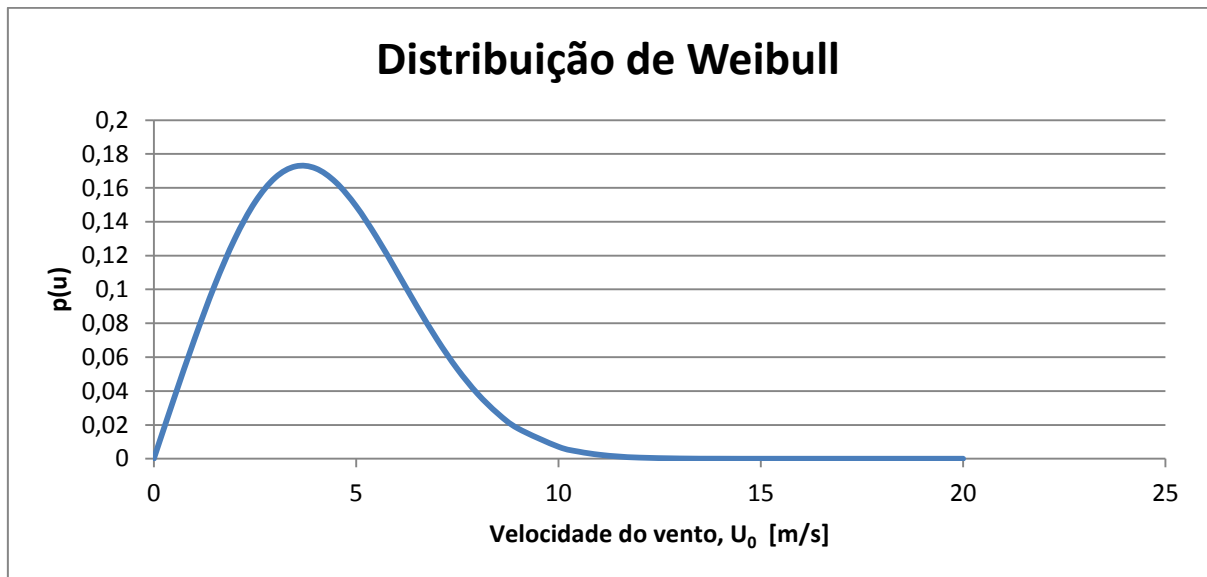


Figura 5. 34- Distribuição de Weibull, relativa à velocidade instantânea do vento ao longo do ano

De referir que a distribuição de Weibull é uma função densidade de probabilidade, sendo o integral da área abaixo do seu gráfico igual a 1, isto é, $p(u)$ é a probabilidade de num determinado instante a velocidade do vento ser u .

5.4.2. Aproveitamento energético conseguido no edifício

Considerando os valores da energia que pode ser produzida/ consumida por ano, em MJ/ano, descritos no gráfico da figura 5.33, e multiplicando os mesmos pela frequência com que a respectiva velocidade do vento ocorre, vem a seguinte distribuição de energia consumida e produzida por ano:

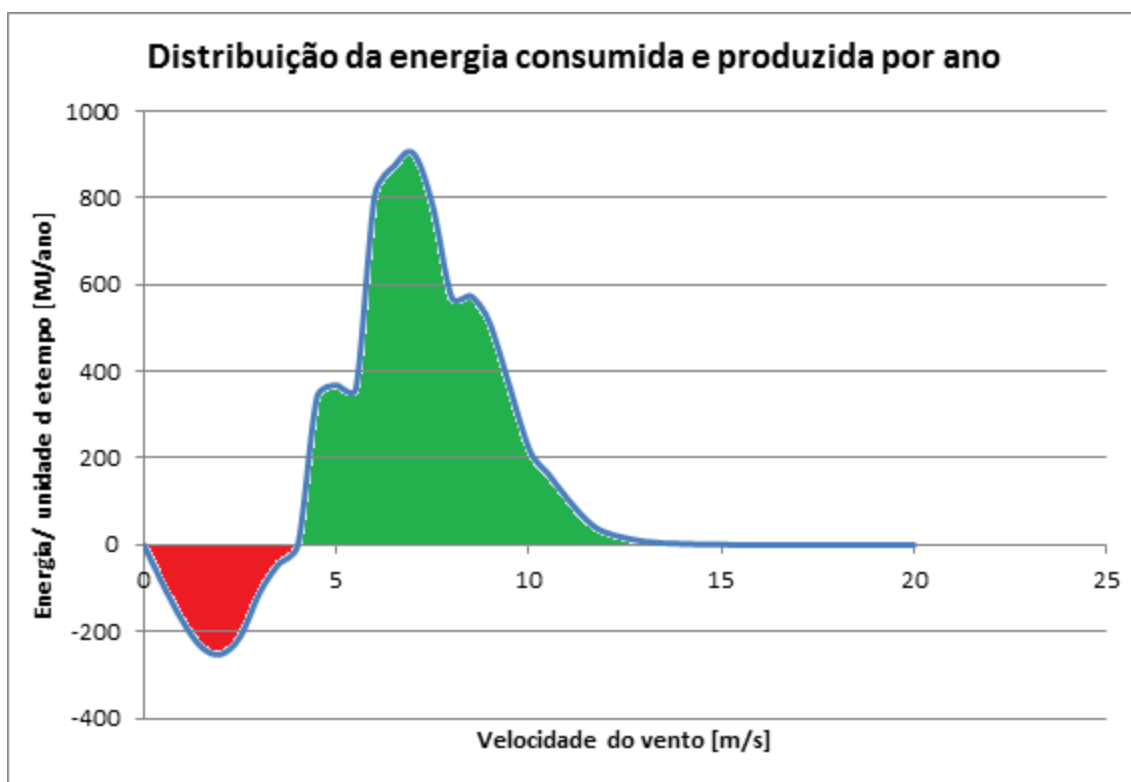


Figura 5. 35- Distribuição da energia consumida e produzida por ano, função da velocidade do vento

Comparativamente ao gráfico da figura 5.32 pode-se observar que existe, de facto, um maior consumo de energia até a velocidade de 4 m/s, como seria de esperar, uma vez que esta gama de velocidades é mais frequente de acontecer. Pode-se observar também que praticamente só se produz energia até aos 12/13 m/s, uma vez que velocidades do vento superiores a estes valores são muito raras de ocorrer ao longo do ano.

Fazendo uma análise meramente quantitativa, pode-se concluir que a energia que se consegue produzir ao longo de um ano através da ventilação natural é largamente superior à energia que se gasta na ventilação do espaço habitado do edifício. Note-se que o valor da energia consumida em ventilação por ano corresponde à área preenchida a vermelho entre o gráfico e o eixo das abcissas, no intervalo de 0 a 4 m/s. De igual modo, a área preenchida a verde, abaixo do gráfico, no intervalo de 4 a 20 m/s, corresponde à energia produzida no edifício, com recurso à ventilação natural, no decorrer de um ano.

De modo a conseguir calcular estas áreas, seria necessário calcular o integral definido nos intervalos referidos, para a função que dá o gráfico da figura 5.34. Como não é possível arranjar uma função que dê exactamente tais valores, optou-se por dividir o gráfico da figura 5.34 em dois. O primeiro gráfico, representado na figura 5.35, corresponde à parte da energia consumida, na gama de velocidades de 0 a 4 m/s. Apenas com estes valores, foi possível fazer uma interpolação que dá uma aproximação razoável aos valores do gráfico.

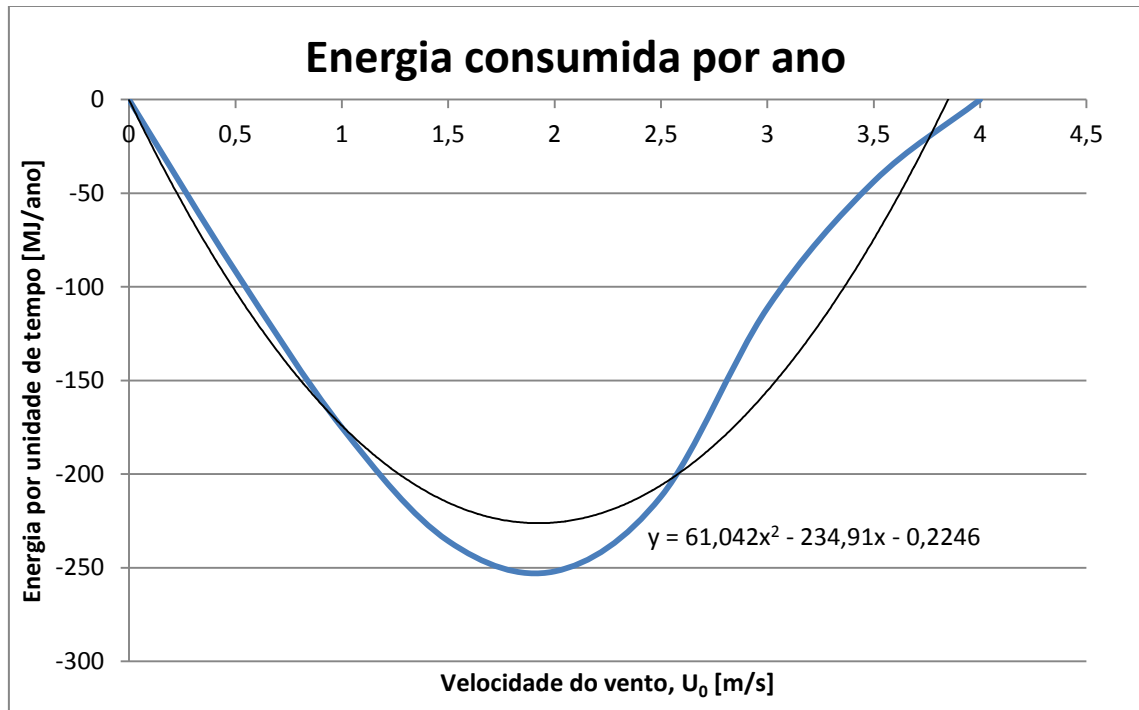


Figura 5. 36- Interpolação do gráfico da energia consumida por ano, função da velocidade do vento

Com a interpolação obtida do gráfico anterior, pode-se fazer o integral no intervalo de velocidades de 0 a 4, obtendo assim a energia consumida para ventilação, por ano:

$$\int_0^4 (61.042x^2 - 234.91x - 0.2246)dx = -557.94 \text{ MJ/ano}$$

Pode-se então concluir que a energia gasta em ventilação ao longo de um ano é de aproximadamente 558 MJ/ano.

De igual modo, para a gama de velocidades de 4 a 20 m/s, obteve-se também uma interpolação que é razoável para aproximar a energia produzida. Neste caso, esta foi de grau 5, visto ser, de todas, a que melhor se adaptou ao gráfico original.

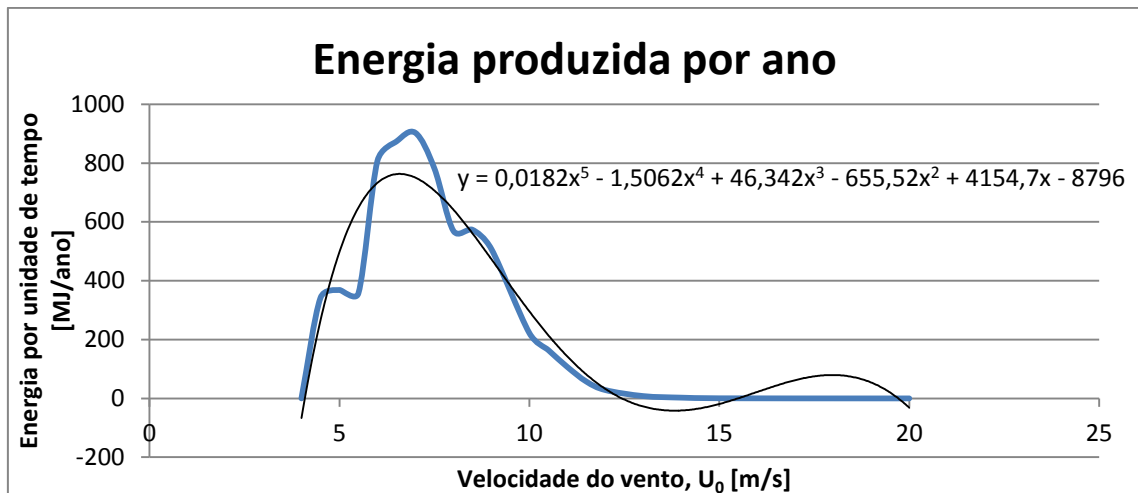


Figura 5. 37- Interpolação do gráfico da energia produzida por ano, função da velocidade do vento

Visto a interpolação não ser a mais correcta a partir dos 12 m/s, optou-se por fazer dois integrais: um no intervalo [4,12] m/s, outro no intervalo de [4, 20] m/s.

$$\int_4^{12} (0.0182x^5 - 1.5062x^4 + 46.342x^3 - 655.52x^2 + 4154.7x - 8796)dx = 3604.13 \text{ MJ/ano}$$

$$\int_4^{20} (0.0182x^5 - 1.5062x^4 + 46.342x^3 - 655.52x^2 + 4154.7x - 8796)dx = 4072.98 \text{ MJ/ano}$$

De modo a ter uma abordagem mais conservativa, optou-se por o valor de 3604 MJ/ano como sendo o valor mais correcto. Daqui, podem ser retiradas algumas ilações: produz-se cerca de 6.24 vezes mais energia do que aquilo que se gasta em ventilação, tendo-se um saldo de, em números redondos, 3000 MJ/ano que são aproximadamente 834 kWh/ano.

De referir que, para este caso de estudo, considerou-se apenas que o edifício tinha uma entrada e uma saída, o que não se aplica na realidade. Neste sentido, o edifício real deverá ter mais perdas de carga do que aquilo que foi considerado. Existem aqui dois casos possíveis: aberturas em série ou em paralelo. Para o caso em que o edifício tem aberturas entre os pisos em série, estas ligam directamente um piso ao outro, como uma porta ou uma janela.

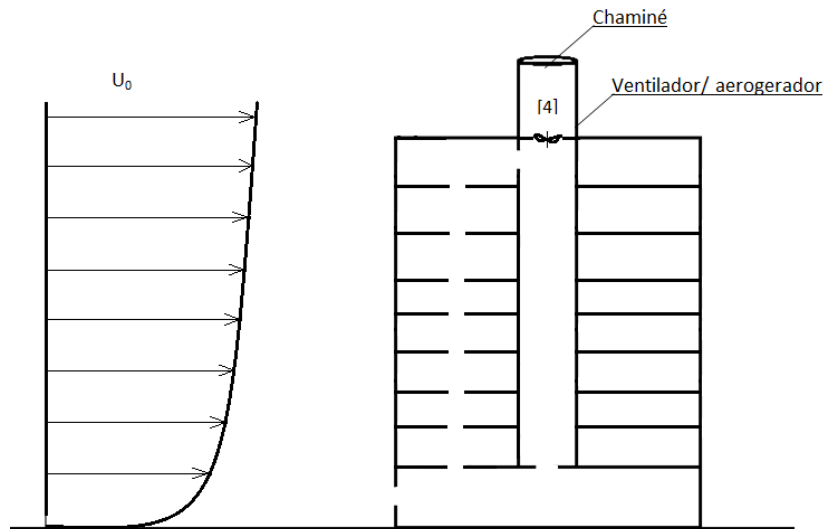


Figura 5. 38- Modelo do edifício com os 8 pisos e as aberturas em série

Uma outra solução, embora conceptual, passa por a colocação de aberturas em paralelo, de modo a diminuir as perdas de carga no edifício, tirando o máximo partido possível da ventilação. Assim, esta concepção passa por uma conduta de admissão, que é alimentada pela abertura de admissão já existente no edifício e que, por sua vez, faz o fornecimento de ar a cada um dos pisos. Este modelo conceptual é esquematicamente resumido na figura 5.38.

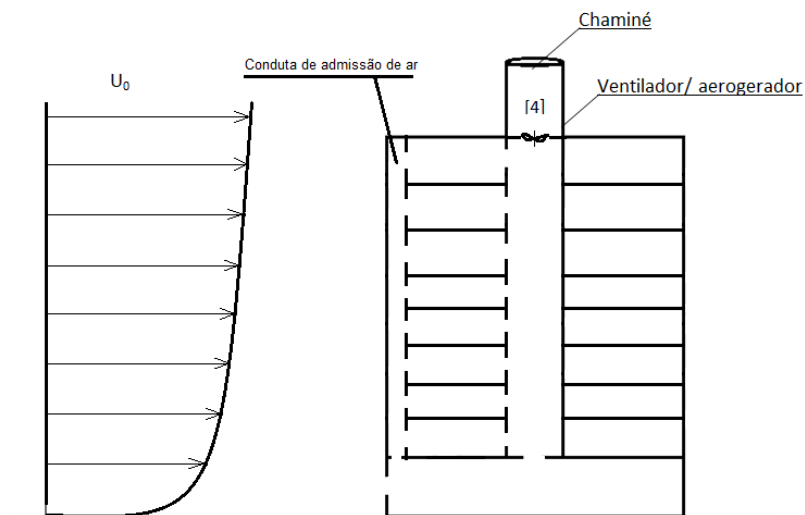


Figura 5. 39- Modelo do edifício, com os 8 pisos e as aberturas em paralelo

6. Conclusões e futuros campos de pesquisa

Uma das motivações que levou à realização deste caso de estudo foi a necessidade crescente dos dias de hoje de haver um consumo energético responsável. Assim, no âmbito da ventilação de edifícios, tentou-se encontrar um modo de poupança de energia. O primeiro objectivo foi analisar a auto-sustentabilidade do edifício, unicamente com recurso ao vento exterior, concluindo-se então que é possível, a partir de uma velocidade do vento de cerca de 4 m/s, assegurar as renovações de ar do espaço habitado, sem que haja recurso a meios mecânicos, ou seja, com gastos energéticos nulos.

Porém, continuavam a existir situações em que se tornava necessário gastar energia com a ventilação. De modo a combater este consumo, decidiu-se então verificar se podia haver um aproveitamento energético da ventilação natural, nas situações em que o vento exterior por si só superava as renovações de ar necessárias para o espaço habitado. Chegou-se de facto à conclusão que consegue haver um aproveitamento energético bastante superior àquilo que se consome com a ventilação, de cerca de 6 vezes mais.

Torna-se importante referir que não é o programa numérico que resolve o problema. O programa, embora parte imprescindível do trabalho, não é mais do que uma ferramenta. O que resolve o problema são os diferentes casos particulares que se criaram, nomeadamente ao nível das diferentes geometrias do edifício, localização das aberturas e das componentes de ventilação nele existentes. Assim, a parte principal do presente trabalho passou por analisar diferentes cenários possíveis, fazendo variar os factores que afectam a ventilação no edifício. O programa, através da informação que lhe foi fornecida, resolveu e forneceu os resultados.

Um outro aspecto relevante foi o aproveitamento do efeito de sucção da chaminé, que é conseguido quando a velocidade do escoamento à saída da chaminé é inferior à velocidade do vento. Este fenómeno teve importância quando, a determinada altura, a velocidade de escoamento na abertura da chaminé estava invertida, isto é, estava a entrar ar pela chaminé. De modo a contornar esta situação, foi necessário aumentar substancialmente a área de saída da chaminé, relativamente à do aerogerador, conseguindo com que o coeficiente de pressão à saída da chaminé continuasse negativo.

Quando se avaliou a potência que era retirada apenas com um aerogerador verificou-se que, além de ser um valor baixo, a velocidade máxima de 20 m/s imposta pela curva de potência era rapidamente atingida na sua abertura, quando a velocidade do vento exterior ainda era relativamente baixa. Deste modo, com o intuito de conseguir aproveitar velocidades do vento maiores, bem como o de aumentar a potência produzida, foram, ainda que conceptualmente, colocados aerogeradores em série. Verificou-se ser esta a melhor solução para o aproveitamento energético do edifício.

Porém, esta solução levanta aqui algumas questões pertinentes, bem como possíveis novos campos de estudo. A primeira é que, na chaminé concebida, não iria haver espaço

suficiente para colocar os n aerogeradores em série, até porque estes têm de ter um certo espaçamento entre eles.

Convém no entanto salientar que tinha sido suficiente fazer o estudo para, no máximo, 15 aerogeradores em série, que conseguem retirar potência para velocidades do vento até 12 m/s. Isto deve-se ao facto de, após a observação da curva de Weibull para a região de Lisboa, se verificar que a partir de valores de velocidade de 11 a 12 m/s a sua frequência de ocorrência era quase nula

Uma outra questão, e esta que pode dar continuidade ao trabalho que aqui foi desenvolvido, é o modo como os aerogeradores iriam ser colocados em série, consoante a velocidade do vento exterior. Assim, seria necessário um sistema que, consoante a velocidade do vento exterior fosse colocar o respectivo número de aerogeradores necessário na chaminé em série, de modo a produzir o máximo de energia que fosse possível.

Também a solução conceptual sugerida no subcapítulo 5.4.2., de alimentação de ar ao edifício através de aberturas em paralelo, com o recurso a uma conduta de admissão é um futuro campo de estudo que pode ser abordado.

Bibliografia

Allard, F., Ghiaus, C., "Natural ventilation in the urban environment: assessment and design". London, Sterling, VA: Earthscan, 2005

Allard, F., Santamouris, F., Alvarez, S., Dascalaki, E., Guarracino, G., Maldonado, E., Sciuto, Salvatore, Vandaale, L., "Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook", London, James and James (Science Publishers) Ltd., 1998

Andrews, J., Jelley, N., "Energy Science: principles, technologies, and impacts". Oxford: Oxford University Press, 2007

Chan, S. C., Che-Ani, A. I., Ibrahim, N. L. Nik, "Passive designs in sustaining natural ventilation in school office buildings in Seremban, Malaysia". International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 2, págs. 172-182, 2013

Costa, P. A. S., "Atlas do potencial eólico para Portugal continental". Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2004

Delgado, J. F. A. D., "Contribuições para o estudo da ventilação natural de edifícios". Lisboa: Dissertação de doutoramento Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 1989

Delgado, J. F. A. Dias, Borges, A. R. Janeiro, Conde, J. M. Paixão, "Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 65, págs. 371-381, 1996

Gil. L., Araújo, S. B., "Apontamentos de Máquinas Hidráulicas", F.C.T.-U.N.L, (2013)

Moghaddam, E. Hamzanlui, Amindeldar, S., Besharatizadeh, A., "New approach to natural ventilation in public buildings inspired by iranian's traditional windcatcher". Procedia Engineering, vol. 21, págs. 42-52, 2011

Saraiva, J. A. G., Delgado, J. F. A. D., Borges, A. R. J., "Pavilhões Industriais: Solicitações, Interferência e Ventilação Natural". Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985

Sequeira, A. A.- “Ventilação natural: (Estudo de um caso de ventilação natural)”. Monte da Caparica: Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010

Siew, C. C., Che-Ani, A. I., Tawil, N. M., Abdullah, N. A. G., Mohd-Tahir, M., “Classification of Natural Ventilation Strategies in Optimizing Energy Consumption in Malaysian Office Buildings”. Procedia Engineering, vol.20, págs.363 – 371, 2011

Teixeira, J. F. B. N. L., “Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada”. Lisboa: Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009

Vaz, D.C., “Energia Eólica: notas do docente de TER-I/MERCEUS”, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 1.^a ed., 2008

Viegas, J.C. “Ventilação Natural de Edifício de Habitação”, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995

Anexo A: Modelação numérica do ventilador e do aerogerador

```

C      VENTILADOR INTERNO
C
C      INSUFLADOR
      IF(IAB(J).EQ.35) THEN
      IF((X(ICPCO(J))+1568.*(ROTV/1500.))**2-X(JBF(K)+1)).LT.0.0) THEN
      F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))
      1+1568.*(ROTV/1500.))**2-0.5*R00*10*X(J)*ABS(X(J))
      RETURN
      END IF
C
      F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))
      1-1.75*X(J)*ABS(X(J))
      1+1568.*(ROTV/1500.))**2
      RETURN
      END IF
C
C      EXAUSTOR
      IF(IAB(J).EQ.36) THEN
      IF((X(ICPCO(J))-1568.*(ROTV/1500.))**2-X(JBF(K)+1)).GT.0.0) THEN
      F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))
      1-1568.*(ROTV/1500.))**2-0.5*R00*10*X(J)*ABS(X(J))
      RETURN
      END IF
C
      F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))
      1-1.75*X(J)*ABS(X(J))
      1-1568.*(ROTV/1500.))**2
      RETURN
      END IF
C
C      1 Aerogerador
      IF(IAB(J).EQ.40) THEN
C
      IF(ABS(X(ICPCO(J))-X(JBF(K)+1)).LT.2.474) THEN
      F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))-0.5*R00*0.2393*X(J)*ABS(X(J))
      RETURN
      END IF
C
      F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))
      1+63.389/X(J)
      1+0.577*X(J)
      1-20.629*X(J)/ABS(X(J))
      RETURN
      END IF
C

```


C 10 Aerogeradores em série
 IF(IAB(J).EQ.40) THEN

C IF(ABS(X(ICPCO(J))-X(JBF(K)+1)).LT.24.74) THEN
 F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))-0.5*R00*2.516*X(J)*ABS(X(J))
 RETURN
 END IF

C F=(X(JBF(K)+2)*H(J)-X(ICPCO(J)+1)*H(IHCO(J)))*G+(X(ICPCO(J))-
1X(JBF(K)+1))
 1+633.89/X(J)
 1+5.77*X(J)
 1-206.29*X(J)/ABS(X(J))
 RETURN
 END IF

Anexo B: Catálogo do ventilador

Elettroventilatori assiali serie - bassa, media pressione
Axial fans series - low, middle pressure
Electroventilateurs hélicoïdaux série - basse, moyenne pression
Axialventilatoren Serie - Nieder, Mitteldruck

EF.../ 9A



IMPIEGO. Sono particolarmente adatti per essere impiegati su canalizzazioni per impianti industriali di essiccazione, condizionamento, aspirazione ed emissioni d'aria (polverosa, umida o con fumi) in grandi portate a basse e medie pressioni. Trovano il loro utilizzo nelle fonderie, cementerie, falegnamerie, industrie chimiche, siderurgiche, ecc. Temperatura d'esercizio: - 20 °C + 60 °C.

DESCRIZIONE COSTRUTTIVA. Accoppiamento a trasmissione. La cassa convogliatrice è costruita in robusta lamiera di acciaio Fe 360 B con doppia flangia a norme DIN 24154 e portello d'ispezione. La cassa inoltre è munita di base per il sostegno del supporto monoblocco e di carter interno per la protezione di cinghie e pulegge, mentre il motore viene piazzato all'esterno della cassa su una base tendicinghie. La girante, pressofusa in lega di alluminio, con pale a profilo alare orientabili da fermo, è accuratamente equilibrata dinamicamente. La verniciatura dei particolari in lamiera viene effettuata mediante immersione in bagno elettrolitico con successiva cottura in forno (+ 180 °C).

Per le grandezze ≥ 1000 i ventilatori sono zincati a caldo di serie.

MOTORE. Il motore è trifase, 220/380V, 50 Hz, forma B3; (altre frequenze, tensioni, costruzioni a doppia velocità o antidiflagrante verranno fornite su richiesta).

FLUSSO D'ARIA. Nella costruzione di serie è previsto il flusso d'aria dal supporto alla girante (flusso "A"). Su richiesta è previsto anche il flusso opposto (flusso "B").

CARATTERISTICHE. Le caratteristiche riportate nei diagrammi sono valide per l'esecuzione senza carter; con il carter subiscono delle variazioni in percentuale come segue:

CARATTERISTICHE - 10%; ASSORBIMENTO - 10%;
RUMOROSITÀ + 1÷2 dB/A.

N.B.: nei diagrammi, nel campo grigio il funzionamento è instabile.

USE. These fans are particularly suitable for the removal of air and noxious gases, and for all those applications where large volumes of air have to be moved at low and medium pressures. They are installed in foundries, woodworks, and in chemical industries.

WORKING TEMPERATURE. - 20 °C + 60 °C.

CONSTRUCTION. Axial-flow fan, belt drive. The impeller is made of die-cast aluminium and has adjustable blades. The casing is made of welded sheet steel and has a double flange. For the size ≥ 1000 the fans are standard hot galvanized.

MOTOR. The motor is three-phase, 220/380 V, 50 Hz, B3; (other frequencies, tensions on demand).

DIRECTION OF THE AIR. Normally supplied with the air flowing from the motor to the impeller (A), on demand the fans can be supplied with the direction from the impeller to the support (B).

SPECIFICATIONS. The characteristics quoted in the tables are valid for the construction without belt protection; as to construction with belt protection, the characteristics change as follows:
CHARACTERISTICS - 10%; ABSORPTION - 10%; NOISE LEVEL + 1÷2 dB/A.

N.B.: In the curves, the grey field indicates unsteady conditions of working.

UTILISATION. Pour séchage, conditionnement, aspiration, c'est-à-dire là où il faut transporter de grands volumes d'air poussiéreux humide ou fumées. Ils trouvent un large débouché dans les fonderies, cimenteries, menuiseries, dans l'industrie chimique. En général ils sont utilisés pour le transport de grands volumes d'air avec basse et moyenne pression.

TEMPÉRATURE D'EXERCISE. - 20 °C + 60 °C.

CONSTRUCTION. Accouplement à courroies, la roue est en aluminium, avec pales profilées, enveloppe à deux brides selon DIN 24154. La roue est soigneusement équilibrée dynamiquement, à haut rendement et avec un niveau sonore réduit. Les pales profilées peuvent être orientées lorsque l'installation est arrêtée. Toutes les pièces en acier sont peintes par électrophorèse.

Pour les diamètres ≥ 1000 les ventilateurs sont galvanisés à chaud en standard.

MOTEUR. Le moteur est triphasé, 220/380 Volt, 50 Hz, forme B3; (autres fréquences, tensions, double vitesse sont livrés sur demande).

FLUX DE L'AIR. Normalement nous fournissons les ventilateurs avec le flux d'air qui va du moteur à la roue (flux "A"). Sur demande l'on peut fournir le sens inverse (flux "B").

CARACTERISTIQUES. Les caractéristiques mentionnées dans les tableaux se réfèrent à la construction sans carter. Pour la construction avec carter les valeurs changent de la manière suivante:

CARACTERISTIQUES - 10%; ABSORPTION - 10%; NIVEAU SONORE 1÷2 dB/A.

N.B.: Aux diagrammes, dans les champs gris le fonctionnement est instable.

ANWENDUNG. Zur Belüftung und Absaugung überall dort wo große Luftmengen bei niedrigen und mittleren Drücken bewegt werden. Anwendung z.B. in Gießereien, Zementfabriken, Schreinereien und in der chemischen Industrie.

BETRIEBSTEMPERATUR. 253 K bis 333 K (-20°C - +60°C).

BAUFORM. Ausführung mit Riemenantrieb, Rohrmodell - Gehäuse aus Stahl mit druck- und saugseitigem Flansch nach DIN 24154 sowie Wartungsklappe. Laufrad aus ex-geschütztem Aluminiumdruckguß mit im Stillstand verstellbaren Profilschaufeln. Alle Laufräder sind präzise dynamisch ausgewuchtet.

Der Motor ist außerhalb des Gehäuses auf einer Riemenspannplatte angebracht. Das Gehäuse ist werkseitig für Befestigung des Blocklagers und des Riemenschutzes vorbereitet. Ausführungen mit Durchmesser < 1000 sind einbrennlackiert - Ausführungen mit Durchmesser ab 1000 werden serienmäßig feuerverzinkt geliefert.

MOTOR. Drei Phasen, 220/380 Volt, 50 Hz, Bauart B3. Andere Spannungen und Frequenzen sowie Sonderausführungen auf Anfrage.

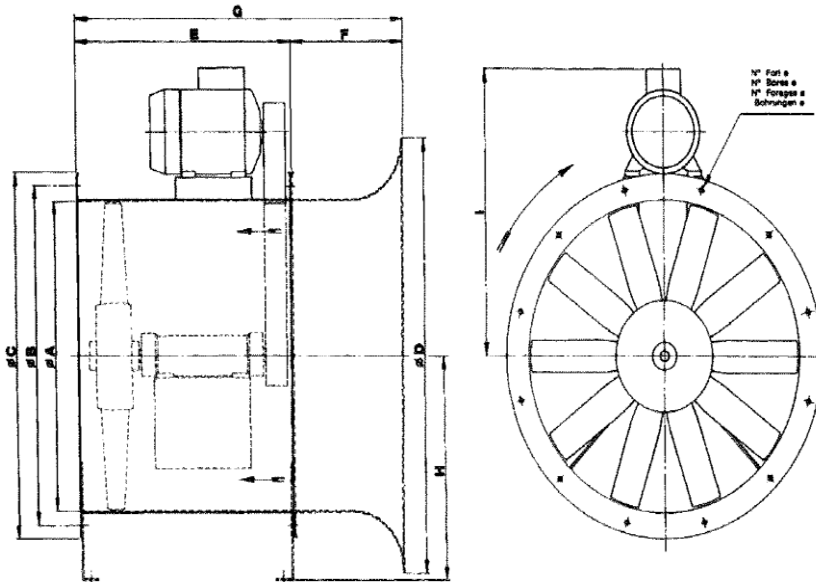
LUFRICHTUNG. Ohne Angabe wird serienmäßig geliefert: Über Lager saugend = "A"; Ausführung über Lager drückend = "B" muß spezifiziert werden.

EIGENSCHAFTEN. Die in den Tabellen aufgeführten Werte gelten für die Ausführungen ohne Riemenschutz. Die in den Tabellen grau unterlegten Bereiche weisen auf die instabilen Betriebsbereiche hin. Bei Ausführungen mit Riemenschutz ändern sich die Leistungsdaten wie folgt:

DRUCK UND VOLUMEN: -10%; STROMAUFNAHME: - 10 %;
GERAUSCHPEGEL: +1÷2 dB/A.

Dimensioni d'ingombro e pesi
Overall dimensions and weights
Dimensions d'encombrement et poids
Maße und Gewichte

EF.../ 9A



Boccaglio e piedini a richiesta
 Inlet nozzle and supports on demand
 Tuyère d'admission et supports sur demande
 Einströmdüse und Füße auf Wunsch

Tipo - Type - Typ														Peso Weight Poids Gewicht	PD ⁽²⁾ GD ⁽²⁾	Tipo - Type - Typ														Peso Weight Poids Gewicht	PD ⁽²⁾ GD ⁽²⁾				
Ventilatore Fan Ventilateur	Motore Motor Moteur	kW ⁽¹⁾ Inst.	kV ⁽¹⁾ Vent.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	N°	Ø	kgf	kgf·m ²	Ventilatore Fan Ventilateur	Motore Motor Moteur	kW ⁽¹⁾ Inst.	kV ⁽¹⁾ Vent.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	N°	Ø	kgf	kgf·m ²		
EF 314/H 9A	71 A4	0,25	2140												26		EF 714/H 9A	90 L4	1,5	1000															
	71 A2	0,37	2400												25			100 LA4	2,2	1000															
	71 B2	0,55	2700												28			100 LB4	3	1300															
	80 A2	0,75	3180	315	355	400	464	475	160	505	226			10	31	0,06		112 M4	4	1500	710	775	815	968	710	224	934	500		16	12	123	2,5		
	90 B2	1,1	3600												34			132 SA4	5,5	1600															
EF 354/H 9A	71 B4	0,37	2030												29		EF 804/G 9A	90 L4	1,5	880															
	71 B2	0,55	2280												31			100 LA4	2,2	1020															
	80 A2	0,75	2670												32			100 LB4	3	1140															
	80 B2	1,1	3020	355	405	440	513	475	170	545	265			8	33	0,08		112 M4	4	1270	800	861	905	1077	750	250	1010	500		16	12	158	3		
	90 L2	1,5	3400												36			132 SA4	5,5	1440															
EF 404/G 9A	71 B4	0,37	1800												32		EF 904/M 9A	100 LB4	3	810															
	80 A4	0,55	2020												34			112 M4	4	910															
	80 A2	0,75	2370												36			132 SA4	5,5	1000															
	80 B2	1,1	2660	400	448	485	587	475	180	655	300			12	34	0,11		132 MA4	7,5	1150	900	958	1005	1190	800	280	1080	600		16	12	195	5,3		
	90 L2	1,5	3010												39			132 MB4	9	1290															
EF 454/H 9A	80 B4	0,75	1720												42		EF 1004/H 9A	100 LB4	3	750															
	90 S4	1,1	1930												45			112 M4	4	840															
	90 L2	1,5	2230												48			132 SA4	5,5	950															
	90 L2	2,2	2510	450	497	535	639	475	190	685	335			12	48	0,25		132 MA4	7,5	1080	1000	1067	1107	1330	900	280	1180	670		24	12	233	7,5		
	100 LA2	3	2930												53			160 M4	11	1190															
EF 504/G 9A	112 M2	4	3250												60		160 L4	15	1360																
	80 B4	0,75	1530												58		EF 1124/G 9A	112 M4	4	710															
	90 S4	1,1	1730												61			132 SA4	5,5	800															
	90 S2	1,5	1980												62			132 MA4	7,5	900															
	90 L2	2,2	2240	500	551	585	700	580	200	780	355			10	65	0,4		160 M4	11	1000	1120	1200	1240	1480	900	315	1215	750		24	12	297	10,6		
100 LA2	3	2570												70		160 L4		15	1130																
EF 584/H 9A	112 M2	4	2910												77		160 M4	18,5	1300																
	90 S4	1,1	1360												69		EF 1258/F 9A	112 M4	4	640															
	90 L4	1,5	1560												72			132 SA4	5,5	720															
	100 LA4	2,2	1780												79			132 MA4	7,5	810															
	100 LA2	3	2040	580	629	665	785	560	212	772	400			10	78	0,9		160 M4	11	900	1250	1337	1380	1670	1000	355	1355	850		24	12	364	14		
112 M2	4	2290												85		160 L4		15	1010																
EF 634/G 9A	132 SA2	5,5	2590												97		160 M4	18,5	1170																
	90 S4	1,1	1180												94		EF 1408/E 9A	132 SA4	5,5	670															
	90 L4	1,5	1330												97			132 M4	7,5	690															
	100 LA4	2,2	1500												104			180 M4	11	780															
	100 LB4	3	1680	630	688	735	871	710	212	922	450			12	106	1,2		180 L4	15	850	1400	1491	1540	1670	950	400	1350	950		32	12	432	18		
112 M4	4	1880												111		180 M4		18,5	970																
EF 634/G 9A	132 SA4	5,5	2180												124		180 M4	22	1110																

Peso con motore
 Weight with motor
 poids avec moteur
 Gewicht mit motor

⁽¹⁾ Potenza motore installata
 Installed motor power
 Puissance moteur installée
 installierte Motorleistung

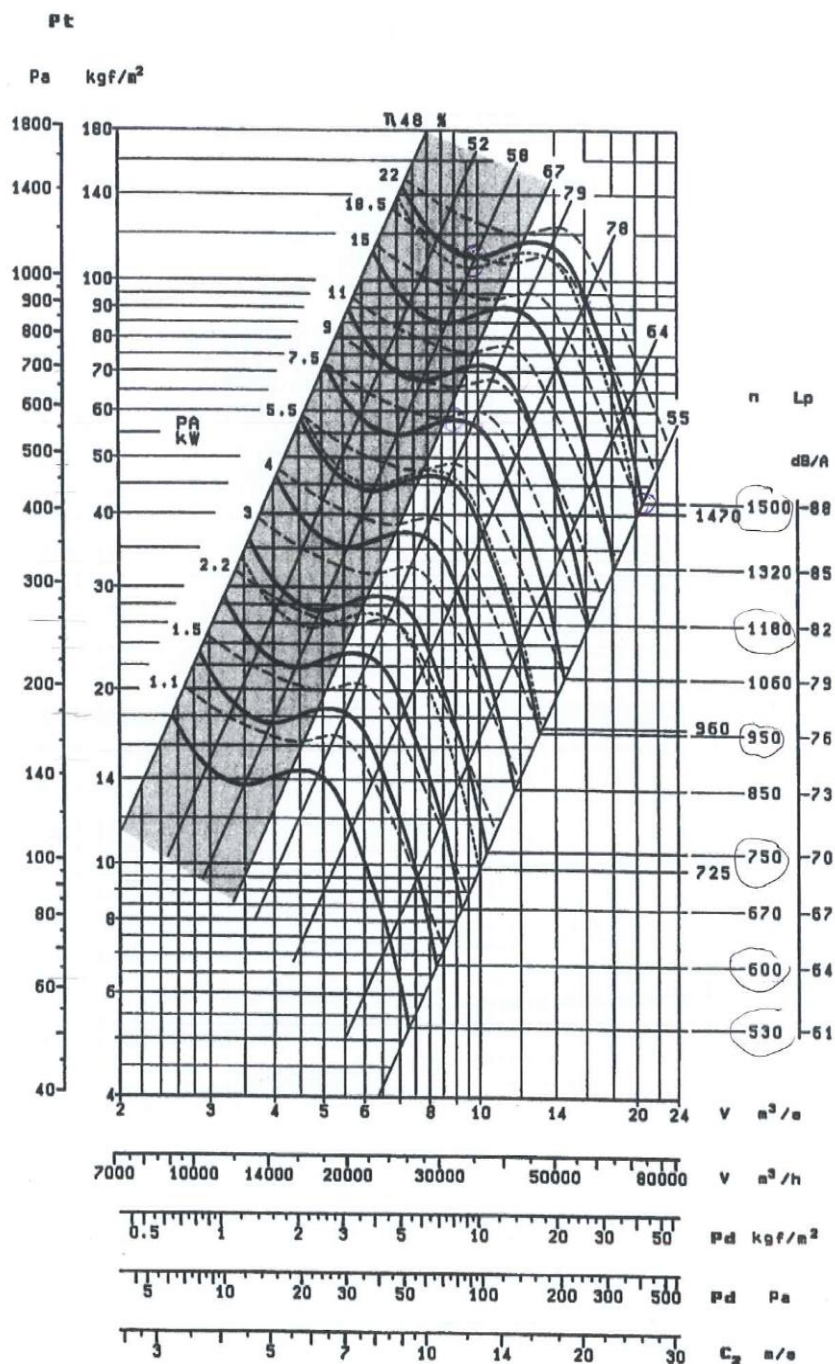
⁽²⁾ Numero di giri consigliato per il ventilatore
 Recommended fan RPM
 Régime conseillé pour le ventilateur
 Für den Lüfter empfohlene Anzahl U/min

Tabella non impegnativa
 The above data are unbinding
 Tableau sans engagement
 Unverbindliche Tabelle

VENT EF 1004/H 9A/A

Angolo Pale 28°

Diagramma di funzionamento in PREMENTE - Diametro girante 1000 mm



Giri massimi ammissibili $\leq 40^\circ\text{C}$ - 1500
 $41 + 60^\circ\text{C}$ - 1320

P_0^2 opp $G_0^2 = 7,5 \text{ kgf.m}^2$

Anexo C: Catálogo do aerogerador

Ampair

HAWT – 0,1 to 0,3 kW

Contact name: George Durrant
 Address: The Doughty Building, Crow Arch Lane,
 Ringwood, Hampshire, BH24 1NZ
 Telephone: +44 (0) 1425 480 780
 Country: **United Kingdom**

Ampair 0,1 kW references

Site	Use	Country
Regis Road Recycling Centre, Camden, London	Electricity generation	UK

Ampair Pacific Hawk / 0,1 kW



Technical information

POWER		Unit
1) Rated power	0,1	kW
2) Rated wind speed	20	m/s
3) Cut-in wind speed	3,5	m/s
4) Cut-out wind speed	None	m/s
5) Maximum wind speed the turbine can withstand	Storm-proof	km/h
DIMENSIONS		
6) Nacelle and rotor weight	12,6	kg
7) Rotor diameter	0,928	m
8) Rotor height (for VAWT only)	-	m
9) Swept area	0,68	m ²
10) Height of the mast	Variable	m
OTHER INFORMATION		
11) Maximum rpm	DK	At rated wind speed
12) Gear box type		None
13) Brake system		Inductors
14) Number of blades		6
15) Blades material		Glass filled polypropylene
16) Output voltage	12 / 24	V
17) Minimum operation temperature	- 30	°C
18) Maximum operation temperature	High temperatures not a problem	°C
19) Acoustic levels at a distance of 20 m? at nacelle? (wind = 5 m/s)	20 at nacelle in strong winds	DB
20) Lifetime	10	Years
21) Is the machine self-starting		Yes
22) Use of an asynchronous generator		No
23) Yaw control system		Wind vane, free yaw
24) Upwind or downwind		Upwind

Calculated power curve

Wind speed (m/s)	Power (W)
1	0
2	0
3	0
4	05
5	11
6	21
7	29
8	38
9	48
10	57
11	65
12	71
13	76
14	81
15	85
16	88
17	90
18	92
19	93
20	95

Power curve

